

Intuitive digitale Fabriklayoutplanung

Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung der Fabrikstrukturplanung in der
Automobilindustrie

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Simon F. Schäfer, M.Sc.

aus Münster (Westf.)

genehmigt von der

Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau

Technische Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung: 28. August 2019

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling

Innovationen der Fabrikplanung und -organisation

Band 41

Simon F. Schäfer

Intuitive digitale Fabriklayoutplanung

Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung der Fabrik-
strukturplanung in der Automobilindustrie

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7027-9

ISSN 1615-5211

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Nur die erfolgreiche Gestaltung und Weiterentwicklung industrieller Wertschöpfung kann auf Dauer unseren Lebensstandard und die Errungenschaften der sozialen Marktwirtschaft absichern. Die Produktion bildet nach wie vor das Rückgrat einer modernen, im globalen Wettbewerb stehenden Industrie-, Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft. Umfassendes Wissen und stetig neue Erkenntnisse auf den Gebieten der Fabrikplanung und Produktionsorganisation sind existentiell notwendig.

Die unternehmerische Bedeutung der Produktionsplanung ist im gleichen Maße gestiegen, wie sich die Innovationszyklen von Produkten, Fertigungs- und Logistiksystemen sowie der Arbeitsorganisation verkürzt haben. Um die vorhandene Marktposition zu festigen oder um Wettbewerbsvorteile zu erlangen, muss jede Unternehmensleitung neben dem Produkt und der Technologie auch die Produktionsstrukturen ständig analysieren, sie rechtzeitig an die zu erwartenden Marktentwicklungen anpassen und gegebenenfalls erneuern.

Die erhöhten Ansprüche an die Gestaltung und Wandlungsfähigkeit von Produktionsstrukturen im turbulenten Umfeld erfordern ein effizientes Projektmanagement und eine durchgehende rechnergestützte Planungsunterstützung. In der vorliegenden Reihe – Innovationen der Fabrikplanung und -organisation – sollen neue Methoden und Instrumente zur Planung und Optimierung von Produktionssystemen und -abläufen einer breiten Leserschaft in verständlicher Form vorgestellt werden. Es sind Forschungsergebnisse die häufig in enger Zusammenarbeit mit der Industrie am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der Technischen Universität Clausthal im Bereich Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik entstanden sind.

Ein gemeinsamer systemtechnischer Ansatz kennzeichnet die Fachgebiete Anlagenplanung und Logistik, deren technische, informationstechnische, organisatorische und wirtschaftliche Fragestellungen ganzheitlich und zukunftsweisend zu beantworten sind. Die angestrebten Lösungsstrategien sind im

Rahmen des gesamten Produkt- und Produktionsentstehungsprozesses zu sehen und beinhalten sowohl eine theoretische, planerische und simulierende Seite als auch die konkrete Ausgestaltung von Prozessketten, Organisationsformen und Abläufen.

In der Vergangenheit wurden Produktionsstrategien, Programme und Teilebedarfe nicht selten aufgrund persönlicher Einschätzung und Erfahrung festgelegt. Heute sind mit Hilfe mathematischer, wissensbasierter Modelle hinreichende Prognosen und Szenarien zu entwickeln und das Komplexitätsmanagement muss bereits bei der Entwicklung variantenreicher Serienprodukte einsetzen. So können z.B. Agentensysteme schon vorausschauend bei der Analyse von Verbindungen möglicher Module helfen.

Früher wurden die darauf aufbauenden Produktionsstrukturen in der Regel nur statisch geplant und für dynamische Betrachtungen allenfalls Mittelwerte herangezogen. Um in Zukunft falsche oder überhöhte Investitionen und unnötige Folgekosten zu vermeiden, sind bestehende und zu planende Anlagen umfassend dynamisch zu analysieren und optimieren. Mit dem inzwischen zur Realität gewordenen ganzheitlichen Ansatz der Digitalen Fabrik kann jetzt – auf Basis eines umfassenden integrierten Datenmanagements durch rechnergestützte Einzelmethoden bis hin zur Virtuellen Realität – der Planungsprozess entscheidend beschleunigt und verbessert sowie die Planungsqualität und -sicherheit erheblich erhöht werden.

Nicht zuletzt gilt es, die in den Produktions- und Logistiksystemen arbeitenden Menschen wieder stärker in den Mittelpunkt zu stellen, ihre Bedürfnisse zu respektieren und ihnen genügend Raum für Engagement und Verantwortung mit effizienten Formen der Arbeitsorganisation zu geben, die Verschwendung vermeiden und eine stetige Steigerung des Produktionsflusses ermöglichen.

Vorwort des Verfassers

Die Fabrikplanung im heutigen Umfeld muss hochkomplexe Themen in kürzester Zeit bearbeiten und gleichzeitig transparent, übersichtlich und vor allem digital sein. Der Schlüssel dazu liegt meiner Meinung nach in intuitiven Methoden und Werkzeugen, welche gleichzeitig den hohen Ansprüchen großer, digitaler Systemwelten genügen. Mit der Zusammenführung dieser beiden Anforderungen beschäftigt sich die vorliegende Dissertationsschrift.

Die Idee zu dem Thema lieferten meine eigenen Erfahrungen in der Automobilindustrie, welche ich zum Abschluss meines Studiums sammeln konnte. In der Folge entstand diese Arbeit während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB) der Technischen Universität Clausthal.

Für die Möglichkeit zur Promotion und für die Betreuung beim Verfassen dieser Dissertationsschrift möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht vom IMAB sehr herzlich danken. Mein Dank gilt darüber hinaus Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling vom Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze vom Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen für die Leitung der Prüfungskommission.

Auf Seiten der Universität bin ich weiterhin meinen Kollegen zu großem Dank verpflichtet. Insbesondere möchte ich hier meinen guten Freund Herrn Dr.-Ing. Thomas Krüger hervorheben, mit welchem ich das Glück hatte zeitgleich die jeweiligen Dissertationen zu verfassen und sogar am selben Tag geprüft wurde. Sicherlich hat das die Sache für uns beide angenehmer gemacht und ich werde die kurzweiligen Tage im Rahmen gemeinsamer Forschungsvorhaben mit ihm vermissen. Außerdem danke ich Herrn Dipl.-Wirtschaftsing. Marco Seewaldt für die kritische Durchsicht und die fachlichen Diskussionen.

Aus den Reihen der Studenten bin ich allen Teilnehmern der praktischen Versuche sehr dankbar, welche sich außerhalb ihrer Lehrveranstaltungen die Zeit genommen haben an den Untersuchungen mitzuwirken. Weiterhin danke ich allen

studentischen Hilfskräften des Instituts die mich unterstützt haben. Stellvertretend seien hier die Herren Barnabas Picker, M.Sc., Niels Baldauf, M.Sc. und Christian D. Heinrich, M.Sc. genannt.

Bei der Volkswagen AG gilt mein Dank für die gute Zusammenarbeit, die wertvollen Hinweise und die Möglichkeit zur praktischen Anwendung meines Prototyps den Herren Dr.-Ing. Alexander König und Dipl.-Wirtschaftsing. Nils Gorke sowie Herrn Dipl.-Ing. Dirk Bohnemeyer.

Wesentlich zu meinem persönlichen Werdegang und zu meinem Verständnis der akademischen Freiheit hat das Corps Borussia Clausthal beigetragen. Das Corps und seine Mitglieder haben mich zu meinem Promotionsvorhaben inspiriert wofür ich sehr dankbar bin. Tiefe und feste Freundschaften sind während meiner Studienzeit entstanden, die mich immer begleiten werden.

Der größte Dank gilt meinen Eltern. Sie haben mich stets gefördert und tragen den wesentlichen Verdienst an dieser Arbeit.

Clausthal, im September 2019

Simon F. Schäfer

Kurzfassung

Die Automobilindustrie ist derzeit geprägt von disruptiven Umbrüchen in allen Unternehmensbereichen. Neue Antriebstechnologien sowie neue Fabrik- und Logistikkonzepte verändern die Rahmenbedingungen der Automobilproduktion entscheidend. Da sich ihre Nutzung über mehrere Jahrzehnte erstreckt, muss die Fabrikstruktur eines Produktionsstandortes schon heute so geplant werden, dass sie auch zukünftige und noch nicht absehbare Technologien und Produktionskonzepte bestmöglich unterstützen wird. Als Teilbereich der Fabrikstrukturplanung legt die Fabriklayoutplanung dabei die räumliche Anordnung der Strukturelemente fest. Aufgrund der neuen Herausforderungen ist neben dem Zusammenwirken verschiedener Fachbereiche vor allem die aktive Integration von Entscheidungsträgern mit entsprechenden Kompetenzen in den unmittelbaren Planungsprozess notwendig, um die anstehenden Grundsatzentscheidungen treffen zu können.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, diese Integration zu ermöglichen, die direkte Kommunikation der Planungsbeteiligten zu verbessern und somit die Entwicklung komplexer und kreativer neuer Lösungen zu fördern. Durch die unmittelbare Abstimmung können Layoutvarianten zudem schneller und qualitativ hochwertiger abgesichert werden. Im Zuge dieser Absicherung gilt es im Hinblick auf die ungewissen zukünftigen Entwicklungen, möglichst viele Layoutvarianten zu planen, auszuwerten und zu vergleichen. Dies ist nur durch Einsatz digitaler Planungswerkzeuge zu realisieren, da die Dokumentation und das Datenmanagement bei der Vielzahl der benötigten Layoutvarianten sowie dem Umfang und der Komplexität der Planung ansonsten nicht durchführbar wären. Aktuell werden in der Automobilindustrie zur Entwicklung von Fabriklayouts Werkzeuge und Methoden eingesetzt, die zwar intuitiv bedienbar sind, jedoch die hohen Ansprüche an die digitale Durchgängigkeit nicht erfüllen oder es kommen komplexe digitale Fabrikplanungssysteme zur Anwendung, welche zur Nutzung umfangreiche Softwarekenntnisse voraussetzen. Dies führt durch die notwendige Übertragung oder Konvertierung und durch anschließende Abstimmungsschleifen zu Zeit- und Informationsverlusten bzw. verhindert die Einbindung entsprechender Kompetenzträger.

In dieser Arbeit soll das Problem der Diskrepanz zwischen der digitalen Durchgängigkeit und der Intuitivität durch die „intuitive digitale Fabriklayoutplanung“ behoben werden. Fokus dieser Methode ist die kreative Planung und die Entfaltung der Fachkompetenz der Entscheidungsträger und Planer. Ihr Ziel ist es, hierarchisch und fachlich unterschiedlichste Akteure in den direkten Planungsvorgang einzubeziehen. Wesentliche Merkmale sind dabei der Abbau von Komplexitätshürden und die Intensivierung der Abstimmung in der frühen Phase der Fabrikplanung. Realisiert wird dies durch eine intuitive Bedienung und eine gemeinsame Datenbasis mit der Systemumwelt.

Auf Grundlage der Eigenschaften der „intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung“ wurde durch den Autor der Prototyp eines Layoutplanungswerkzeugs mit Touch Bedienung entwickelt und in das Fabrikplanungssystem eines deutschen OEM integriert. Neben zahlreichen Anwendertests am IMAB der TU Clausthal wurde der Prototyp auch durch eine Pilotanwendung in der Industrie umfangreichen Analysen unterzogen. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Verbesserung des Prototyps ein und bildeten so die Grundlage für die Pilotierung, bei welcher das Layoutwerkzeug in operativen Planungsprojekten eines OEM zum Einsatz kam. Hierbei wurde die Integration von Entscheidungsträgern in den unmittelbaren Planungsvorgang angestrebt und anhand von mehreren Kriterien der Einfluss auf die Entwicklung von Layouts bewertet. Der industrielle Einsatz wurde durch eine formative Evaluation begleitet, welche die kontinuierliche Weiterentwicklung des Prototyps ermöglichte. Durch die Optimierung konnte der Prototyp in mehreren Projekten an verschiedenen Standorten des OEM bei Layoutworkshops mit Entscheidungsträgern (z.T. mit direkter Vorstandseteiligung) erfolgreich eingesetzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die „intuitive digitale Fabriklayoutplanung“ Entscheidungsträger besser als zuvor unmittelbar in den Planungsprozess einbezogen werden können. Gleichzeitig kann die benötigte Planungs- und Abstimmungszeit reduziert sowie die Datenqualität gesteigert werden. Die vorliegende Arbeit stellt damit eine wichtige Grundlage zur Entwicklung von zukunftsfähigen Automobilstandorten von morgen dar.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers.....	iii
Vorwort des Verfassers	v
Kurzfassung	vii
Inhaltsverzeichnis.....	ix
Abkürzungsverzeichnis.....	xii
1 Einleitung	1
1.1 Disruptive Umbrüche in der Automobilindustrie.....	1
1.2 Problemstellung.....	5
1.3 Zielsetzung.....	6
1.4 Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen und Stand der Technik der Fabriklayoutplanung	11
2.1 Begriffsdefinitionen	11
2.2 Fabriklayoutplanung	17
2.2.1 Ziele der Fabriklayoutplanung.....	17
2.2.2 Layoutplanung im Fabrikplanungsprozess	22
2.2.3 Ablauf der Layoutplanung	27
2.2.3.1 Strukturplanung	28
2.2.3.2 Dimensionierung.....	30
2.2.3.3 Groblayoutplanung	31
2.2.4 Layoutplanung in der frühen Phase	33
2.3 Digitale Fabrik.....	34
2.3.1 Definition	35
2.3.2 Datenmanagement	37
2.3.3 Digitale Layoutplanung	39
2.4 Intuitive Planung.....	42
2.4.1 Intuition, Intuitivität und intuitive Benutzbarkeit	43
2.4.2 Definition intuitive Planung.....	45
2.4.3 Partizipative Planung.....	46
2.5 Analyse der Methoden und Werkzeuge der Layoutplanung	49
2.5.1 Stand der Technik	50
2.5.1.1 Analoge Methoden und Werkzeuge	50

2.5.1.2	Digitale Methoden und Werkzeuge	51
2.5.1.3	Hybride Methoden und Werkzeuge	54
2.5.2	Vor- und Nachteile bisheriger Systeme	56
2.6	Zusammenfassung des Untersuchungsbedarfs.....	59
3	Konzeptentwicklung eines intuitiven digitalen Planungswerkzeugs.....	63
3.1	Intuitive digitale Fabriklayoutplanung	63
3.1.1	Einfachheit der Bedienung	64
3.1.2	Schnelligkeit der Planung	65
3.1.3	Ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung.....	67
3.1.4	Definition.....	68
3.2	Beschreibung des Anwendungsbereichs.....	72
3.2.1	Zielfelder der Planung	72
3.2.1.1	Materialfluss und Logistik	72
3.2.1.2	Wandlungsfähigkeit	77
3.2.1.3	Wirtschaftlichkeit	84
3.2.2	Auswahl einer Layoutalternative.....	86
3.3	Ableitung von Anforderungen an das neu zu entwickelnde Layoutwerkzeug	89
3.3.1	Generelle Anforderungen der Layoutplanung.....	89
3.3.2	Spezifische Anforderungen der frühen Fabriklayoutplanung	90
3.3.3	Digitale Durchgängigkeit	90
3.3.4	Intuitivität.....	92
4	Prototypische Realisierung des Layoutwerkzeugs PTLAYOUT	95
4.1	Umsetzungskatalog.....	95
4.1.1	Layoutmanipulation	95
4.1.2	Objektbibliothek.....	96
4.1.3	Kollisionsprüfung.....	97
4.1.4	Flächenauswertung	98
4.1.5	Datenmanagement	100
4.1.6	Dokumentation	102
4.1.7	Benutzeroberfläche.....	103
4.2	Programmierung.....	104

4.2.1	Umsetzung der aufgenommenen Anforderungen	105
4.2.2	Integration in das Systemumfeld eines Automobilherstellers	112
5	Praktische Anwendungen und Bewertung	117
5.1	Anwendertests	119
5.1.1	Beschreibung Anwendungsbeispiel und Aufgabenstellung	119
5.1.2	Gruppentest	125
5.1.3	Vergleich mit anderen Methoden und Werkzeugen	128
5.1.4	Beispielhafte Planungsergebnisse	131
5.2	Pilotanwendung in der Industrie	133
5.2.1	Technische und funktionelle Überprüfung	135
5.2.2	Auswertung der Evaluation	137
6	Ergebnisse, kritische Reflexion und Ausblick	143
6.1	Ergebnisse	143
6.2	Kritische Reflexion	145
6.3	Ausblick	148
7	Zusammenfassung	151
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis	V
	Literaturverzeichnis	VII
	Anhang	XXVII
	Lebenslauf	XXXVII

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AR	Augmented Reality
BEV	Battery Electric Vehicle (Batterieelektrisches Fahrzeug ohne Verbrennungsmotor)
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Design
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CPS	Cyber-physisches System
DMU	Digital Mock-up (digitales Versuchsmodell)
ELAB	Elektromobilität und Beschäftigung – Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung (Studie)
FAPLIS	Fabrikplanungs- und Informationssystem (Daimler)
GUI	Graphical User Interface
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Voll-Hybridfahrzeug)
HLS	Hallen-Layout-System (Volkswagen)
HOAI	Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (konventionelles Fahrzeug mit Verbrennungskraftmaschine)
IMAB	Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, TU Clausthal
IoT	Internet of Things
IUUI	Intuitive Use of User Interfaces (Forschungsgruppe)
JIS	Just-in-Sequence (Logistikkonzept)
JIT	Just-in-Time (Logistikkonzept)
JPH	Jobs per hour (Produktionsstückzahl pro Stunde)
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LKW	Lastkraftwagen
MDL	MicroStation Development Language (Programmiersprache)
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle (Mild-Hybrid-Variante eines konventionellen Fahrzeugs)
MRK	Mensch-Roboter-Kooperation bzw. -Kollaboration
NFC	Near Field Communication
NWA	Nutzwertanalyse
OEM	Original Equipment Manufacturer
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Plug-in-Hybridfahrzeug)
PKW	Personenkraftwagen
PTLayout	Planungstisch-Layout (Prototyp des Layoutwerkzeugs)

Abkürzung	Bedeutung
RPP	Robuster Produktionsprozess (VDA-Standard)
SFPS	Systematisches Flächenplanungssystem (VDI 3644)
VBA	Visual Basic for Applications (Programmiersprache)
VDA	Verband der Automobilindustrie
VR	Virtual Reality

Dateiformat	Bedeutung	Hersteller
*.csv	Comma-separated values	unabhängig
*.dgn	Design	Bentley Systems
*.dgnlib	Design File Libraries	Bentley Systems
*.dwg	Drawing	Autodesk
*.ifc	Industry Foundation Classes	unabhängig
*.iges	Initial graphics exchange specification	unabhängig
*.jt	Jupiter Tessellation	unabhängig
*.mvba	MicroStation-VBA	Bentley Systems
*.step	Standard for exchange of product model data	unabhängig

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund sich fortlaufend ändernder Märkte muss sich die produzierende Industrie kontinuierlich an die wechselnden Bedingungen anpassen. Dazu ist es erforderlich, neben der Entwicklung neuer Produkte und Dienstleistungen sowie Produktionstechnologien auch die Neugestaltung der Fabriken permanent voranzutreiben. Diese müssen als Ort der industriellen Wertschöpfung aktuelle und zukünftige Produktionsprozesse ermöglichen und bestmöglich unterstützen. Grundlage eines effizienten Industriestandortes ist das Fabriklayout, welches als Endergebnis der Fabrikstrukturplanung die Anordnung von Produktionsbereichen, Logistikflächen und Gebäuden festlegt.

Im besonderen Maße ist derzeit die Automobilbranche von einer grundsätzlichen Umstrukturierung betroffen. Anhand der Bedürfnisse dieser Branche soll in dieser Arbeit ein neues Werkzeug zur Fabriklayoutplanung entwickelt werden.

1.1 Disruptive Umbrüche in der Automobilindustrie

Die Automobilindustrie ist derzeit geprägt von grundlegenden Umbrüchen in verschiedenen Bereichen. Zum einen befindet sich die Branche mitten in der Umstellung auf die Elektrofahrzeugproduktion, zum anderen hat die Digitalisierung maßgeblichen Einfluss auf die Neu- und Umgestaltung aller Geschäftsprozesse. Beide Aspekte haben tiefgreifende Konsequenzen in allen Unternehmensbereichen zur Folge. Die Umbrüche können somit als disruptiv angesehen werden.

Prägend für die Digitalisierung der Branche ist die Industrie 4.0, die vierte industrielle Revolution. Sie bezeichnet die intelligente Vernetzung im Produktionsbereich. Der Kern ist das Internet der Dinge (IoT) und die damit einhergehenden neuen Möglichkeiten, Ressourcen, Dienste und Menschen in der Produktion auf Basis Cyber-physischer Systeme (CPS) in Echtzeit zu verbinden [Bauernhansl et al. 2016, S. 6]. Wesentliche Bausteine sind der Digitale Schatten und der Digitale Zwilling.

Beide Begriffe beschreiben digitale Abbilder der industriellen Realität, welche sich jedoch in ihren Detaillierungsgraden und den funktionellen Eigenschaften

unterscheiden. „Der Digitale Schatten [...] ist das hinreichend genaue Abbild der Prozesse in der Produktion, Entwicklung und angrenzenden Bereichen [...]“ mit dem Ziel, eine Betriebsdatenauswertung in Echtzeit zu ermöglichen [Bauernhansl et al. 2016, S. 23]. Der Digitale Zwilling erweitert das Konzept des Digitalen Schattens um ein der Realität entsprechendes Systemverhalten und eine bidirektionale Verknüpfung dieser beiden Welten [Matysczok et al. 2018, S. 24]. Die Industrie 4.0 greift damit die Vision der Digitalen Fabrik auf [Stark et al. 2015, S. 134], Konzepte für die Fabrik vor Neu- und Umgestaltungen virtuell zu realisieren und zu testen [Wiendahl 2002a, S. 121]. Eine Basis der Industrie 4.0 sind daher die verschiedenen digitalen Modelle der Digitalen Fabrik [Bracht et al. 2018, S. 52-53].

Komplexere Prozesse werden durch die Industrie 4.0 möglich, während sich gleichzeitig die Steuerung und Kontrolle erleichtert. Menschliche Arbeit wird dadurch wieder auf entscheidungsorientierte und kreative Aufgaben verlagert [Schuh und Burggräf 2018, S. 197]. Durch die Smart Services der Industrie 4.0 entsteht die Smart Factory und Shop- und Office-Floor verschmelzen immer mehr [Wegener 2018, S. 3]. Diese Aspekte verändern die Automobilproduktion entscheidend und müssen in zukünftigen Planungen berücksichtigt werden.

Neben der Digitalisierung ist der Wandel zur Elektromobilität eine weitere bedeutende Herausforderung für die Automobilindustrie. Schon 2013 konnte der disruptive Charakter dieser Entwicklung belegt werden [Schneider und Grösser 2013]. Jedoch bekam sie erst ab 2015 eine höhere Dynamik aufgrund unzulässiger Abgaswerte bei Dieselfahrzeugen. Das darauffolgende Umdenken hinsichtlich der Antriebstechnologien führte zu einer gestiegenen Relevanz der Elektromobilität für die Hersteller. Der Vergleich der beiden Studien ELAB und ELAB 2.0 zeigt, dass die Veränderungsgeschwindigkeit der Elektrifizierung stark zugenommen hat [Spath et al. 2011; Bauer et al. 2018].

Zukünftige Marktentwicklungen werden in diesem Zusammenhang beispielsweise mittels Szenario-Management antizipiert. Hierzu gibt es verschiedene Veröffentlichungen, die Szenarien zur Elektromobilität darstellen [Brand et al. 2012; Münnich 2014]. Eine Analyse dieser Studien und der aktuellen Marktsituation zeigt, dass die Entwicklung zur Elektromobilität von diesen

Untersuchungen zunächst überschätzt wurde, durch die zunehmende Veränderungsgeschwindigkeit jedoch die Trendszenarien für das Jahr 2025 bzw. 2030 bereits heute in Teilen zutreffen. Aktuelle Szenarien gehen von einem Anstieg des Anteils der reinen Elektrofahrzeuge im europäischen Absatzmarkt von derzeit ca. 1 % auf 25 % bis 80 % bis zum Jahr 2030 aus (**Abbildung 1-1**).

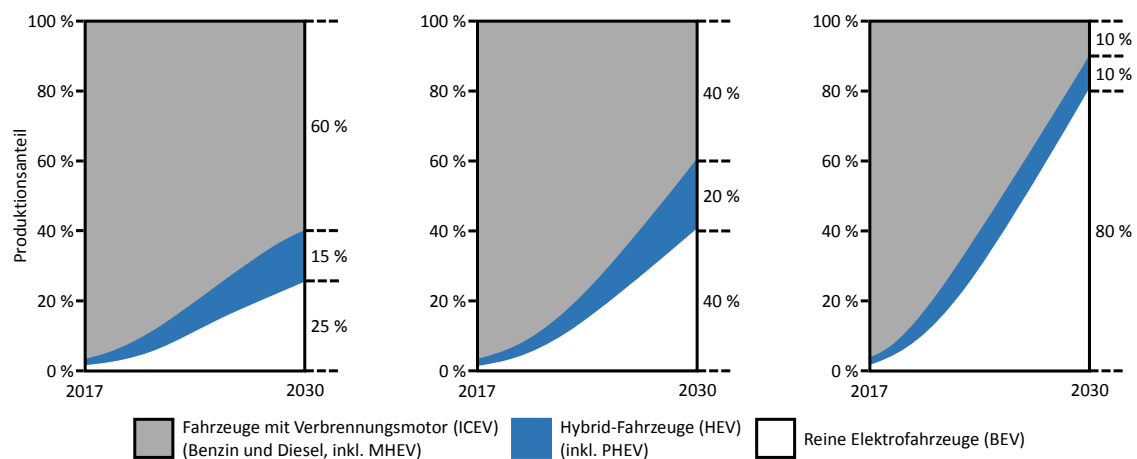


Abbildung 1-1: Drei Szenarien zur Entwicklung des Produktionsanteils von Elektrofahrzeugen in Deutschland bis 2030 [nach Bauer et al. 2018, S. 35-37]

Schon das hinsichtlich der Elektromobilität pessimistischste Szenario (in der Abbildung links) bedeutet für die Automobilindustrie, dass jedes vierte produzierte Fahrzeug voll elektrifiziert sein wird, weshalb aktuelle Fabrikstrukturen angepasst und Neuplanungen an diesen erweiterten Anforderungen ausgerichtet werden müssen.

Neben den beiden vorgestellten disruptiven Umbrüchen im Bereich Digitalisierung und Elektromobilität gibt es außerdem neue Technologien, welche die Automobilproduktion verändern werden. Diese sind unter anderem die additive Fertigung [Möhrle und Emmelmann 2016], autonomes Fahren, synthetische Kraftstoffe, Mensch-Roboter-Kooperation [Zhang et al. 2017], hybrider Karosseriebau, Predictive Analytics [Reinhart 2017, S. 10] sowie neue intelligente Lackierprozesse [Klein 2018a]. Zudem werden sich nicht nur die Produktion und die Produktion verändern, auch angrenzende Prozesse, wie die Logistik, sind von den Umbrüchen betroffen [Dunker 2019]. Die stärksten Veränderungen werden jedoch im Produktionsbereich erwartet [Kuhnert et al. 2018, S. 12].

Ein deutlich sichtbares Beispiel dieser Veränderungen in der Produktion ist die Auflösung des Fließbandes und die Einführung einer modularen Montage mit Fertigungsinseln. Dies wird realisierbar, da die Industrie 4.0 unterschiedliche Takte und flexible Vernetzungen ermöglicht – aber auch erfordert –, um eine hohe Variantenvielfalt wirtschaftlich produzieren zu können [Bauernhansl 2016, S. 456].

Die variantenflexible Fabrik wurde schon früher beschrieben [Schenk und Schulte 2003, S. 18-25], wird jedoch erst durch die zuvor dargestellten Möglichkeiten der Industrie 4.0 erreichbar. Die neuen Technologien führen unter anderem zu einer Verdreifachung des Automatisierungsgrades in der Montage [Ulbrich 2018, S. 20]. Folglich finden seit einigen Jahren tiefgreifende Rekonfigurierungsprozesse in der Produktion statt, um diese für die Zukunft zu rüsten. Die Konzepte bei der Anpassung unterscheiden sich je nach Hersteller.

Audi führt die „*Modulare Montage*“ ein, in welcher die Karossen auf autonomen, fahrerlosen Transportsystemen voneinander unabhängige Fertigungsinseln anfahren [Waltl 2016, S. 20-21]. Einen ähnlichen Ansatz wählt Porsche: Auf der „*Flexi-Line*“ liefern fahrerlose Transportsysteme zu vorgegebenen Arbeitsstationen und reduzieren so die Weglänge [Mayer 2018, S. 15]. Daimler hingegen geht einen anderen Weg und plant in der „*Factory 56*“ die Einführung des „*Full-Flex*“-Konzepts [Klein 2018b, S. 13-14]. Hierdurch soll es möglich werden, verschiedenste Fahrzeuge und Technologien auf einer Linie zu fertigen. Auch BMW prognostiziert das Ende der solitären Fertigung und reagiert mit „*Flexlinien*“ [Horstmeier 2018, S. 19]. Hingegen will die Marke Volkswagen PKW mit der Umrüstung eines gesamten Werks auf 100 % Elektrofahrzeugproduktion über die Skaleneffekte wirtschaftlich produzieren und gleichzeitig die Zahl der im Werk gefertigten Modelle verdoppeln [Volk 2018, S. 12-14]. Dies ist der Beginn der „*Challenge 27*“, dem Transformationsprozess des konzernweiten Produktionsnetzwerks in Richtung Elektromobilität [Ulbrich 2018, S. 18].

Im Zuge der Anpassungen der Produktion ist in der Folge ein grundsätzliches Überdenken und Ertüchtigen der Fabrikstrukturen erforderlich, da diese die Rahmenbedingungen und damit die Möglichkeiten der Umgestaltung festlegen.

Weil das Ergebnis dieses Transformationsprozesses noch nicht abgesehen werden kann, ist die Planung einer wandlungsfähigen Fabrik¹ notwendig.

Die Ablösung des Fließbands und der Wechsel vom Verbrennungsmotor zu anderen Antriebstechnologien zeigen eindrucksvoll den disruptiven Charakter der beschriebenen Veränderungen. Beide Technologien haben die Automobilindustrie seit über 100 Jahren geprägt. Der Bruch mit diesen Axiomen macht neue Fabrikkonzepte notwendig.

1.2 Problemstellung

Die Fabrikplanung ist heute mit diversen Trends und Herausforderungen sowie inhärenter Komplexität konfrontiert [Loos und Körkemeyer 2014, S. 48]. Die Herausforderungen an die Wandlungsfähigkeit und auch die Flexibilität steigen durch die eingangs beschriebenen disruptiven Umbrüche und die sich erhöhende Volatilität der Märkte. Bereits vor der Beschleunigung des Wandels zur Elektromobilität waren die Ansprüche global aufgestellter Fabriken an die Wandlungsfähigkeit und Flexibilität gegenüber den 1990er-Jahren um ein Vielfaches gestiegen [Schönheit 2013, S. 85]. Von dieser Entwicklung ist anzunehmen, dass sie sich durch die zunehmende Geschwindigkeit der Veränderungen tendenziell eher weiter verschärft als entspannt. Für die Transformation bei den Zukunftsthemen Elektromobilität und Digitalisierung der Werke sollen daher beispielsweise im Volkswagen Konzern in den nächsten fünf Jahren 44 Milliarden Euro investiert werden [Berlin und Beutnagel 2019, S. 25]. Um solch einen Wandel erfolgreich zu gestalten, braucht es neue Konzepte und vor allem progressive Entscheider [Arnold et al. 2010, S. 32].

Grundlegend neue Fabrikkonzepte werden in der frühen Phase der Fabriklayoutplanung entwickelt. In Anbetracht der strategischen Dimension der Planungen adressiert dabei die domänenspezifische, getrennte Betrachtung einzelner Produktionsbereiche die Herausforderungen nur unzureichend. Hier ist neben dem Zusammenwirken verschiedener Fachbereiche die Integration von

¹ Wandlungsfähigkeit: Vermögen einer Fabrik, aktiv ihren Aufbau bei geringem Aufwand verändern zu können [Wiendahl et al. 2005, S. 13]

Entscheidern mit entsprechenden Kompetenzen gefragt, um die anstehenden Grundsatzentscheidungen treffen zu können. Auch höhere Hierarchieebenen und die Experten neuer Technologien müssen dementsprechend direkt in den Planungsprozess eingebunden werden können.

Zudem gilt es angesichts der veränderten Anforderungen, die Planungsmethoden und -werkzeuge hinsichtlich ihrer Zukunftsausrichtung zu überprüfen und gegebenenfalls weiterzuentwickeln. Die klassischen Lösungselemente, Methoden und Werkzeuge der Fabrikplanung werden zwar erhalten bleiben, müssen jedoch deutlich erweitert werden [Nyhuis und Bischoff 2017, S. 32]. Im Hinblick auf die unsicheren zukünftigen Entwicklungen müssen viele mögliche Varianten geplant, ausgewertet und verglichen werden. Dies ist nur durch digitale Planungswerkzeuge zu realisieren, da die Dokumentation und das Datenmanagement der Planung bei der Vielzahl der benötigten Varianten ansonsten nicht realisierbar wären.

In der Automobilindustrie existieren dazu umfangreiche digitale Fabrikplanungssysteme, welche in die komplexe Softwarelandschaft der Automobilhersteller eingebunden sind und im Verbund mit anderen Programmen arbeiten. Diese medienbruchfreie Zusammenarbeit der Systeme wird als digitale Durchgängigkeit bezeichnet. Die Fabrikplanungssysteme erfüllen zwar die Anforderungen an das Datenmanagement, erfordern jedoch umfangreiches Expertenwissen bei der Bedienung [Kerber 2016, S. 199]. Daher können bisher nicht alle relevanten Akteure in den Planungsprozess eingebunden werden.

Es fehlt in der Automobilindustrie somit ein Werkzeug zur Fabriklayoutplanung, das intuitiv zu bedienen ist und die Integration von Entscheidern ermöglicht sowie gleichzeitig die hohen Anforderungen an die digitale Durchgängigkeit erfüllt.

1.3 Zielsetzung

Um den beschriebenen disruptiven Umbrüchen begegnen zu können, muss die Fabriklayoutplanung zukünftig verstärkt am strategischen Horizont ausgerichtet werden. Dazu ist ein Layoutwerkzeug erforderlich, welches den gestiegenen Anforderungen der frühen Phase der Fabriklayoutplanung eines Volumenherstellers in der Automobilindustrie begegnet. Hieraus ergibt sich die Leitfrage dieser Arbeit:

Wie muss ein Werkzeug zur Layoutplanung gestaltet sein, damit es angesichts der disruptiven Veränderungen des Automobilbaus die Entwicklung zukünftiger Fabriklayouts in der frühen Phase unterstützen kann?

Ausgehend von der Leitfrage werden zur Erarbeitung einer Gesamtlösung mehrere Teilziele bestimmt. Zunächst müssen die Anforderungen definiert werden, welche an ein Werkzeug zur Layoutplanung gestellt werden. Angesichts der strategischen Dimension der disruptiven Veränderungen und der benötigten Kompetenzen ist zu klären, wie Entscheidungsträger in den direkten Planungsvorgang besser integriert werden können. Dies soll über die intuitive Benutzbarkeit des Werkzeugs erreicht werden. Die Arbeit hat demnach folgendes Teilziel:

Erarbeitung der Anforderungen an ein intuitives Werkzeug zur Layoutplanung, um die Integration von Entscheidungsträgern in den direkten Planungsvorgang zu ermöglichen.

In der Automobilindustrie existiert eine umfassende digitale Systemwelt. Bei der Planung ist daher darauf zu achten, dass bestehende Daten verschiedener Fachbereiche verarbeitet sowie Planungsergebnisse an andere Systeme weitergereicht werden können. Soll ein Planungswerkzeug in diesem Systemverbund eingesetzt werden, so muss weiteres nachstehendes Teilziel erfüllt werden:

Definition von notwendigen Merkmalen eines Planungswerkzeugs, um die digitale Durchgängigkeit in der Automobilindustrie zu gewährleisten.

Auf Basis der Anforderungen an ein intuitives Werkzeug zur Layoutplanung und unter Berücksichtigung der Merkmale für die digitale Durchgängigkeit soll ein Konzept für ein Layoutwerkzeug entwickelt werden, welches beide Eigenschaften in sich vereint. Ein Teilziel der Arbeit ist daher:

Entwicklung eines Konzepts für ein intuitives und digitales Layoutwerkzeug.

Zur Überprüfung des durch dieses Teilziel konzeptionierten Layoutwerkzeugs soll ein Prototyp entwickelt werden. Dieser wird in mehreren Tests erprobt und dient dem Nachweis der Realisierbarkeit sowie der Erfüllung der zuvor erarbeiteten Anforderungen. Das letzte Teilziel lautet dementsprechend:

Realisierung eines Prototyps und Bewertung des Konzepts und der Umsetzung anhand praxisnaher Tests.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit ist in sieben Kapitel untergliedert. Ein wichtiges Element ist dabei die Anwendungsorientierung. Wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit ist daher nicht nur die Entwicklung eines Konzepts eines intuitiven digitalen Werkzeugs zur Fabriklayoutplanung, sondern auch die prototypische Realisierung und die Durchführung von Anwendertests sowie der Einsatz in der Praxis. Den Aufbau der Arbeit zeigt **Abbildung 1-2**.

	Kapitel	Inhalt
1	Einleitung	Einführung in das Thema, Problemstellung und Zielsetzung
2	Grundlagen und Stand der Technik der Fabriklayoutplanung	Darstellung der Grundlagen sowie Definition der intuitiven Planung, Analyse der Methoden und Werkzeuge der Layoutplanung sowie Identifizierung Untersuchungsbedarf
3	Konzeptentwicklung eines intuitiven digitalen Planungswerkzeugs	Definition der intuitiven digitalen Layoutplanung, Beschreibung des Anwendungsbereichs sowie Zielfelder der Planung, Ableitung von notwendigen Funktionen an das neue Layoutwerkzeug
4	Prototypische Realisierung des Layoutwerkzeugs PTLAYOUT	Aufstellung eines Umsetzungskatalogs und Beschreibung der Realisierung
5	Praktische Anwendungen und Bewertung	Durchführung von Anwendertests und Einsatz in der Industrie
6	Ergebnisse, kritische Reflexion und Ausblick	Ergebnisdarstellung und Ausblick auf weitere Forschungsmöglichkeiten
7	Zusammenfassung	Zusammenfassung der Arbeit

Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit

Nach diesem ersten einleitenden Kapitel werden zunächst die Grundlagen erarbeitet. Diese sind in Begriffsdefinitionen (Kapitel 2.1), die Grundlagen der Fabriklayoutplanung (Kapitel 2.2), der Digitalen Fabrik (Kapitel 2.3) und der intuitiven Planung (Kapitel 2.4) unterteilt. Im Anschluss wird auf Basis dieser

Ausführungen der Stand der Technik dargestellt und dazu Methoden und Werkzeuge der Layoutplanung analysiert (Kapitel 2.5). Die Zusammenfassung des Untersuchungsbedarfs erfolgt in Kapitel 2.6.

Auf dieser Grundlage wird ein Konzept eines Layoutplanungswerkzeugs in Kapitel 3 entwickelt. Zunächst wird die intuitive digitale Fabrikayoutplanung definiert (Kapitel 3.1) und durch die Beschreibung des Anwendungsbereichs und der Zielfelder komplettiert (Kapitel 3.2). Kapitel 3.3 dient der Ableitung konkreter Anforderungen an das neue Layoutwerkzeug.

In Kapitel 1 wird das konzipierte Werkzeug prototypisch realisiert. Die umzusetzenden Funktionen werden in Kapitel 4.1 anhand der vorherigen Ausführungen festgelegt. Die Programmierung und Integration in das Systemumfeld eines Automobilherstellers werden in Kapitel 4.2 vorgenommen.

Kapitel 5 dient der Bewertung von Konzept und Prototyp. Hierzu werden zwei Anwendertests anhand eines Praxisbeispiels durchgeführt (Kapitel 5.1) sowie der Prototyp im industriellen Umfeld pilotiert (Kapitel 5.2).

Den Schluss bildet die Darstellung der Ergebnisse (Kapitel 6.1) und eine kritische Reflexion von Konzeptentwicklung und prototypischer Realisation der intuitiven digitalen Fabrikayoutplanung (Kapitel 6.2). Diese werden durch einen Ausblick auf weitere Forschungsmöglichkeiten ergänzt (Kapitel 6.3).

Das Kapitel 7 fasst die Arbeit zusammen.

2 Grundlagen und Stand der Technik der Fabriklayoutplanung

Wesentliche Grundlagen und Zusammenhänge der Fabriklayoutplanung werden in diesem Kapitel dargestellt. Der Fokus liegt hierbei auf der frühen Konzeptphase. Nach wichtigen Begriffsdefinitionen für die Arbeit (Kapitel 2.1) wird ein Überblick der Fabriklayoutplanung (Kapitel 2.2) gegeben. Weiterhin wird die Digitale Fabrik und die digitale Layoutplanung (Kapitel 2.3) erläutert sowie der Begriff der intuitiven Planung definiert (Kapitel 2.4).

Anhand dieser Grundlagen werden in Kapitel 2.5 bestehende Methoden und Werkzeuge der Layoutplanung hinsichtlich der Zielsetzungen analysiert. Nach der Analyse wird in Kapitel 2.6 der Untersuchungsbedarf zusammengefasst, aufgrund dessen im anschließenden Kapitel 3 die Konzeption der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung erfolgt.

2.1 Begriffsdefinitionen

Die **Fabrik** ist definiert als „Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet“ [VDI 5200 Blatt 1, S. 3]. Planungstätigkeiten in diesem Bereich werden übergreifend als **Fabrikplanung** bezeichnet. Diese ist definiert als „systematischer, zielorientierter, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierter und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführter Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“ [VDI 5200 Blatt 1, S. 3]. Eine ausführliche Darstellung verschiedener Fabrikplanungsvorgehen mit unterschiedlicher Phaseneinteilung erfolgt in Kapitel 2.2.2.

Eng verwandt damit ist das **Werk**. Dieses ist ein „örtlich-räumlich geschlossener Produktionsbereich mit definierten Produktionsaufgaben an einem Standort. Ein Werk kann mehrere Gebäude aufweisen. Hinzu kommen interne Wegenetze, Außenanlagen sowie die Anbindung an die werksexterne Infrastruktur.“ [VDI 5200 Blatt 1, S. 7] Die Begriffe der Fabrik und des Werks werden in der Literatur teilweise synonym gebraucht. Die nachfolgend erläuterten Begriffe der Fabrikplanung

können dementsprechend auch auf die Werksplanung übertragen werden. In dieser Arbeit wird einheitlich der Ausdruck „Fabrik“ verwendet.

Der Begriff der **Fabrikstruktur** wird unterschiedlich beschrieben. Dies ist auf den insgesamt sehr weit gefassten Begriff der Struktur zurückzuführen. In dieser Arbeit wird darunter das strukturelle Systemkonzept verstanden. Es besagt, dass „[...] ein System als eine Ganzheit miteinander verknüpfter Elemente [...]“ betrachtet wird [Ropohl 2009, S. 75]. In diesem Zusammenhang gilt für die Fabrikstruktur, dass sie die Elemente der Fabrik und ihre Beziehungen untereinander beschreibt [Harms 2004, S. 12].

Einzelne Elemente der Fabrik können in **Strukturierungsebenen** zusammen gefasst werden [Eversheim und Schuh 1996, S. 9-67]. Die Gestaltung der Ebenen erfolgt in den entsprechenden **Planungsebenen** [VDI 5200 Blatt 1, S. 7]. Zwischen den Ebenen bestehen Wechselwirkungen, da die unteren Ebenen jeweils Teilbereiche der übergeordneten Ebenen darstellen. **Tabelle 2-1** gibt eine Übersicht der Strukturierungs- und Planungsebenen der Fabrik.

Tabelle 2-1: Strukturierungs- und Planungsebenen der Fabrik [nach Eversheim und Schuh 1996, S. 9-67; VDI 5200 Blatt 1, S. 7]

Strukturierungsebenen [Eversheim]	Planungsebenen [VDI 5200]
Standortstruktur	Produktionsnetz
Generalstruktur	Werk
Gebäudestruktur	Gebäude
Bereichsstruktur	Segment
Betriebsmittelstruktur	Arbeitsplatz

Bei der **Fabrikstrukturplanung** nach VDI 5200 Blatt 1 wird der Funktionsablauf sowie die Struktur nach gewählten Kriterien (z.B. der Technologie) festgelegt. Im weiteren Sinne werden zusätzlich die Dimensionierung und räumliche Anordnung der Strukturelemente vorgenommen [Grundig 2018, S. 42; Pawellek 2014, S. 149]. Ergebnis dieser Anordnung ist das Fabriklayout.

Ein **Layout** ist in der Fabrikplanung eine körperliche Anordnung von industriellen Anlagen, womit ein Anordnungs-, Aufstellungs- oder Einrichtungsplan gemeint ist [Schmigalla 1995, S. 344-345; VDI 4499 Blatt 1, S. 47-48]. Die **Layoutplanung** ist dementsprechend die Planungsaktivität, welche Layouts gestaltet. Dabei ist zwischen der Mikro- und Makrolage von Objekten zu differenzieren. Während bei der Festlegung der Mikrolage eine Vielzahl von detaillierten technischen Einflussgrößen berücksichtigt werden müssen, kann die Makrolage durch ein einfaches **Blockschema** (auch **Blocklayout**) festgelegt werden. Infolge der vielen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen mit anderen Bereichen der Fabrikplanung ist die Layoutplanung ein hochkomplexer Vorgang, welcher zwar rechnergestützt durchgeführt werden kann, jedoch zwingend planerischer Erfahrung bedarf [Schmigalla 1995, S. 345; VDI 4499 Blatt 1, S. 48]. Die Layoutplanung findet auf allen Planungsebenen zur Anordnung der jeweiligen Strukturelemente Anwendung.

Das **Fabriklayout** als Ergebnis der Fabrikstrukturplanung ist die räumliche Darstellung von Makrostandorten der Funktionseinheiten (Bereiche, Werkstätten, Freiflächen) im gesamten Fabrikgelände [Grundig 2018, S. 143]. Es entspricht demnach der Anordnung der Elemente der Strukturierungsebenen Gebäude- und Generalstruktur. Ein **Produktionslayout** ist hingegen die Anordnung der Anlagen und Arbeitssysteme auf Produktions- und Logistikbereichsebene (Bereichsstruktur) [Wiendahl et al. 2001, S. 189; Hernández 2003, S. 68].

Je nach Ebene und Phase sind Planungsaufgaben zu unterscheiden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Ebene der Generalstruktur. Der **Generalbebauungsplan** (auch Fabrikleitplan/Masterplan) stellt einen verbindlichen Leitplan für die Nutzung eines Geländes dar. Hauptzielsetzungen sind daher die langfristige Sicherstellung eines guten Gesamtproduktionsflusses, einer guten Flächennutzung und guter Erweiterungsmöglichkeiten [Kettner et al. 1984, S. 125].

Die zum Einsatz kommenden Methoden und Werkzeuge definieren sich wie folgt: Allgemein ist eine **Methode** ein „Weg zur Lösung von Problemen im Rahmen der Erfüllung einer bestimmten Aufgabe“ [ADB 1992, S. 161], worunter in der Fabrikplanung eine „[...] planmäßige, bestimmte Vorgehensweise zum Erreichen eines Ziels [...]“ [Dombrowski et al. 2009, S. 33] verstanden wird. Dieses Verständnis

wird in der Informatik im Hinblick auf die formal-logische Datenverarbeitung präzisiert: Eine Methode ist eine „systematische zielgerichtete Vorgehensweise, sowie [ein] durchdachtes Verfahren, welches für eine Vielzahl von Problemen zu einer sinnvollen Lösung führt.“ [Claus und Schwill 2006, S. 410].

Hingegen sind **Werkzeuge** „physisch vorhandene Mittel [...], die zur Zielerreichung eingesetzt werden können. Werkzeuge können einer Methode zugeordnet sein, aber auch für sich allein [...] stehen.“ [Dombrowski et al. 2009, S. 33] Ein **IT-gestütztes Werkzeug** „[...] stellt die software-technische Implementierung einer Methode oder einer Kombination von mehreren Methoden dar, um diese rechnergestützt einsetzen zu können.“ [Bracht et al. 2018, S. 86]

Grundsätzlich lassen sich in der Fabrikplanung vier **Planungsgrundfälle** unterscheiden: Neuplanung (engl. „Green-Field“), Umplanung (engl. „Brown-Field“), Rückbau und Revitalisierung [VDI 5200 Blatt 1, S. 4; Loos 2013, S. 17]. Grundig ergänzt diese Fälle um die Erweiterung bestehender Industriebetriebe bzw. Fertigungskomplexe [Grundig 2018, S. 18].

Während des **Fabriklebenszyklus** können diese Planungsfälle mehrfach auftreten. Der Zyklus besteht aus fünf Phasen [Schenk et al. 2014, 149-150; Grundig 2018, S. 15]:

- I. Entwicklung
- II. Aufbau
- III. Anlauf
- IV. Betrieb
- V. Abbau

Dieser Lebenszyklus kann für die Elemente einer Fabrik weiter differenziert werden. Die wichtigsten Elemente der Lebenszyklusbetrachtung sind hierbei Produkte, Technologien und Gebäude, die sich durch unterschiedlich lange Zyklusdauern und -verläufe unterscheiden, jedoch durch Wechselwirkungen voneinander anhängig sind (**Abbildung 2-1**).

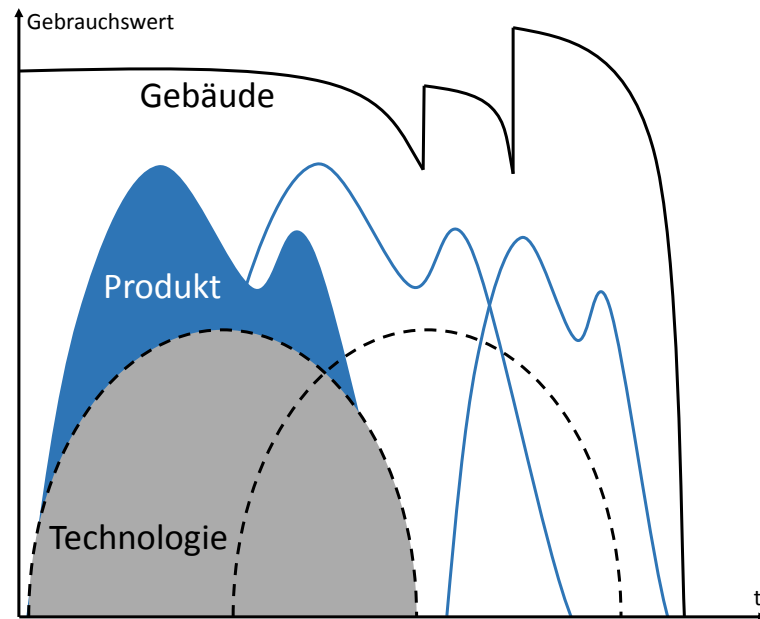


Abbildung 2-1: Zusammenhang zwischen Produkt-, Technologie- und Gebäudelebenszyklus [nach Schenk et al. 2014, S. 148]

Der **Gebäudelebenszyklus** umfasst die größte Zeitdauer. Eine Gebäudestruktur muss während ihrer Lebensdauer mehrere Produkte und Technologien unterstützen. Die besondere Bedeutung der Generalbebauungsplanung wird hieran deutlich: Durch den langen Zyklus legt die Bebauung langfristig die Rahmenbedingungen der Produktion fest und muss mit besonderer Sorgfalt geplant werden. Sinkt der Gebrauchswert des Gebäudes ab, wird er mehrfach durch Sanierungs- oder Restrukturierungsmaßnahmen wieder erhöht. Produkt- und Technologiezyklen sind wesentlich kürzer und werden durch die zunehmend schneller erfolgenden Produkterneuerungen und -wechsel immer kürzer.

Die hohe Komplexität der Fabrikplanung und die Vielfalt der zu berücksichtigenden Anforderungen und Rahmenbedingungen erfordert die Zusammenarbeit unterschiedlichster Fachrichtungen. Vorhaben der Fabrikplanung werden deshalb in interdisziplinären Teams durchgeführt, um die notwendige Fachkompetenz und entsprechendes Domänenwissen zusammen zu bringen [Spur 1994, S. 13-14; Schenk et al. 2014, S. 9-10; Grundig 2018, S. 19].

Die Arbeit dieser Teams erfolgt in unterschiedlichen Formen. Zu unterscheiden ist zwischen **Kooperation** und **Kollaboration** (Abbildung 2-2).

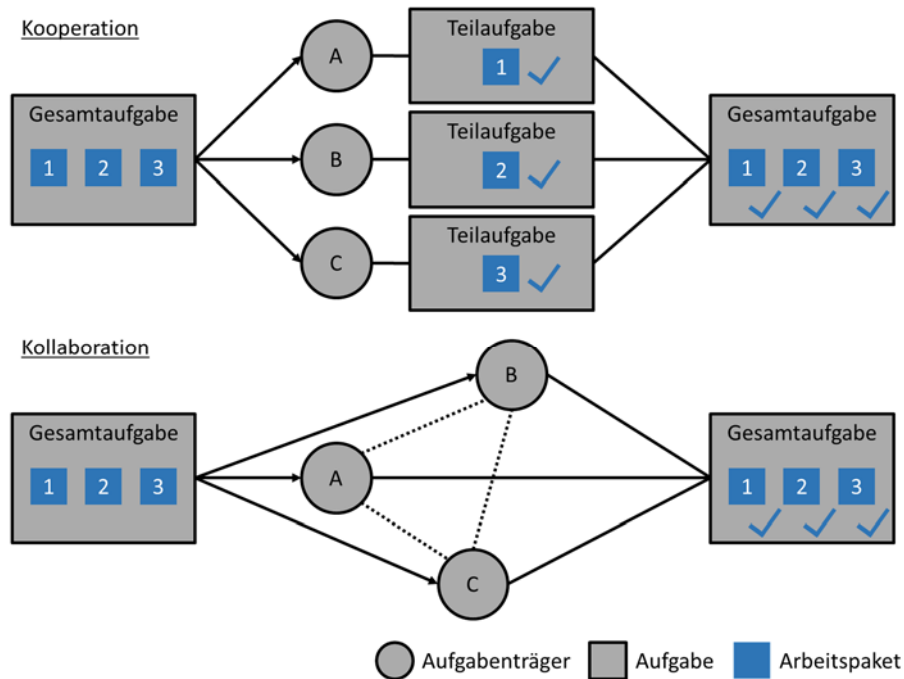


Abbildung 2-2: Kooperation und Kollaboration im Vergleich

Kooperation beschreibt die Zusammenarbeit durch die Gliederung einer Gesamtaufgabe in mehrere Teile, welche eigenverantwortlich, aber mit einem gemeinsamen Gesamtziel, bearbeitet werden [Roschelle und Teasley 1995, S. 70].

Kollaboration hingegen ist die gemeinsame Bearbeitung einer Aufgabe in enger Zusammenarbeit [Roschelle und Teasley 1995, S. 70]. Durch Kollaboration entsteht in der Zusammenarbeit ein erweitertes Verständnis der zu bearbeitenden Aufgabe, welches durch einzelne Aufgabenträger nicht erreichbar gewesen wäre [Schrage 1990, S. 40]. Kollaboration kann also durch den wechselseitigen und sich gegenseitig beeinflussenden Prozess beim kollaborativen Arbeiten von Individuen mit sich ergänzenden Fähigkeiten gänzlich neue Lösungen für Probleme generieren.

Sowohl Kooperation als auch Kollaboration finden in der Fabrikplanung Anwendung. Aufgabenträger bei diesen verschiedenen Formen der Zusammenarbeit können Individuen oder auch Organisationseinheiten sein: Kooperation beschreibt die Arbeitsteilung zwischen Planungsabteilungen oder beteiligten Firmen, welche fachspezifische Aufgaben erfüllen. Kollaboration wird angewandt, wenn gemeinsam Aufgaben bearbeitet werden, die die Fachkompetenz

mehrerer Bereiche erfordern, wie beispielsweise bei der Entwicklung von Konzepten oder Layouts.

2.2 Fabriklayoutplanung

Die Layoutplanung wird allgemein als Teil der Strukturplanung verstanden und erfüllt in diesem Zusammenhang die Aufgabe, die Ergebnisse der vorhergehenden Planungsphasen (etwa Flächenermittlung, Dimensionierung, usw.) in ein reales Bezugsschema zu überführen [Pawellek 2014, S. 182]. Die Fabriklayoutplanung ist demnach Teil der Fabrikstrukturplanung und ordnet die zuvor gebildeten Strukturelemente der Gebäude- und Generalstruktur räumlich an. Das Ergebnis dieser Anordnung ist das Fabriklayout [Grundig 2018, S. 143] (vgl. auch Kapitel 2.1).

Im Folgenden werden zunächst die der Fabriklayoutplanung übergeordneten Ziele der Fabrikplanung dargestellt und eine Einordnung in den Fabrikplanungsprozess vorgenommen. Danach erfolgt eine Darstellung des Ablaufs der Layoutplanung sowie der besonderen Anforderungen der Layoutplanung in der frühen Phase.

2.2.1 Ziele der Fabriklayoutplanung

Die Fabriklayoutplanung verfolgt verschiedene Ziele, welche sich aus den übergeordneten Zielen der Fabrikplanung ableiten. Diese sind wiederum an den strategischen Unternehmenszielen ausgerichtet [Grundig 2018, S. 53]. Die Ziele der Fabrikplanung können nach dem morphologischen Modell der *VDI 5200 Blatt 2* in die vier Ebenen Werk, Gebäude, Segment und Arbeitsplatz (vgl. Kapitel 2.1) und die drei Gestaltungsfelder Organisation, Technik und Immobilie eingeordnet werden [VDI 5200 Blatt 2, S. 2-5].

Die Ziele der Fabrikplanung sind sehr vielfältig und lassen sich nicht abschließend auflisten. Unter anderem umfassen sie: Flexibilität, Wandlungsfähigkeit, Produkt- und Prozessqualität, Geschwindigkeit und Wirtschaftlichkeit [VDI 5200 Blatt 1, S. 5]. Nach *Wiendahl* können die vier Zielfelder Wirtschaftlichkeit, Attraktivität, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit unterschieden werden [Wiendahl 1996; Wiendahl und Hernández 2002; Wiendahl et al. 2005]. Die verfolgten Ziele können

sich je nach Planungsfall unterscheiden. Einzelne Ziele oder auch Zielfelder können dabei auch in Konkurrenz zueinander stehen (vgl. Kapitel 3.2.1.1 bis 3.2.1.3).

Eine vom Planungsfall (vgl. Kapitel 2.1) abhängige Auswahl der Ziele und eine individuelle Zielhierarchie sowie Gewichtung führen zu einem spezifischen Zielprofil für eine Fabrik. Die Fabrikziele dienen während der Planung zur Bewertung von Alternativen hinsichtlich ihres Zielbeitrages [VDI 5200 Blatt 1, S. 5]. Die zum Abschluss des Planungsvorhabens durchgeführte Fabrikbewertung erfolgt anhand des Erfüllungsgrades der Fabrikziele [VDI 5200 Blatt 1, S. 21].

Da durch die Fabriklayoutplanung die räumliche Anordnung der Generalstruktur gestaltet wird, ist für sie im Allgemeinen das Zielfeld der Wandlungsfähigkeit von besonderer Bedeutung. Als Wandlungsfähigkeit wird das Vermögen einer Fabrik bezeichnet, ausgehend von internen und externen Auslösern, aktiv ihren Aufbau auf allen Ebenen bei geringem Aufwand verändern zu können [Wiendahl et al. 2005, S. 13]. Es stellt damit das Potential dar, auch jenseits eines vordefinierten Handlungsspielraums in Bezug auf Organisation und Technik schnelle Anpassungen bei geringem Investitionsaufwand durchführen zu können [Reinhart et al. 2008, S. 51].

Davon abzugrenzen ist der Begriff der Flexibilität. Dieser bezeichnet den definierten Handlungsspielraum zur Veränderung, der eine elastische Anpassung ohne substanzielle Veränderung der Fabrikstruktur ermöglicht [Wiendahl und Hernández 2000, S. 38]. Der Zusammenhang zwischen Wandlungsfähigkeit und Flexibilität wird in **Abbildung 2-3** dargestellt.

Während die Flexibilität einer Fabrik häufig durch die Anlagentechnik gewährleistet wird, um somit absehbare Veränderungen (etwa in der Stückzahl) innerhalb eines Flexibilitätskorridors zu ermöglichen, entspricht die Wandlungsfähigkeit einem Wechsel zu einem anderen Flexibilitätskorridor. Die Flexibilität umfasst die Strukturebenen bis zur Bereichsebene; die Ebene der Generalstruktur ist nur durch Wandlungsfähigkeit veränderbar [Wiendahl 2002b, S. 126].

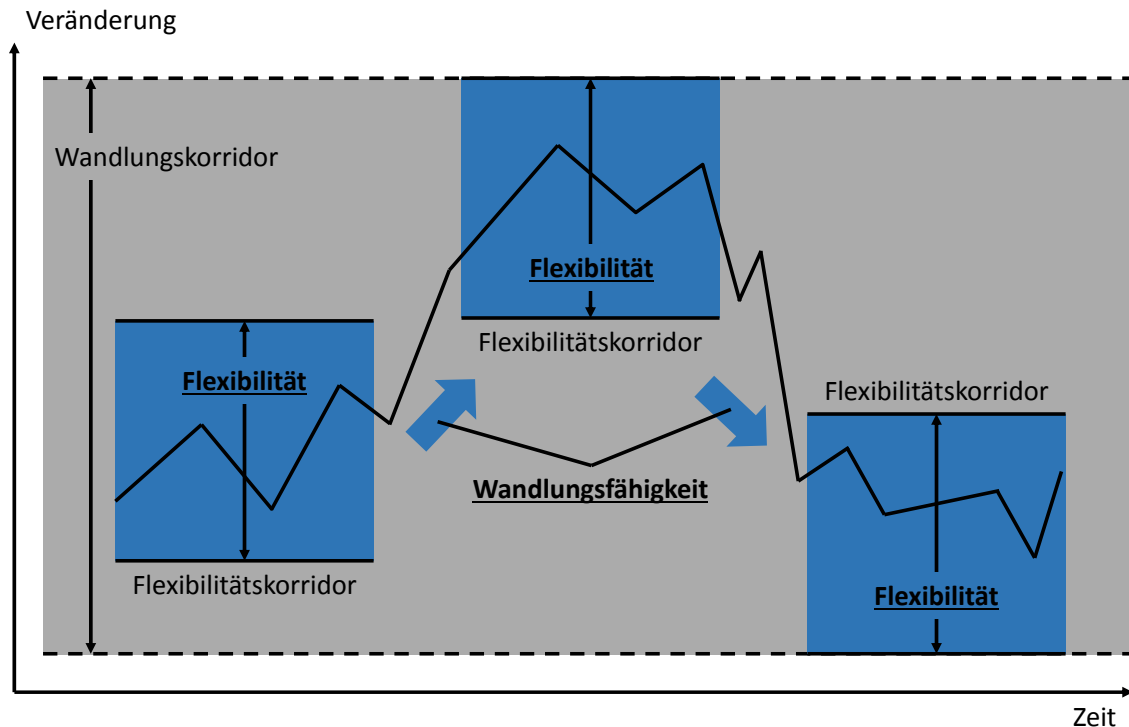


Abbildung 2-3: Zusammenhang von Wandlungsfähigkeit und Flexibilität [nach Zäh et al. 2005, S. 78; Reinhart et al. 2008, S. 47-51; Wiendahl et al. 2014, S. 129]

In der durch *Hernández und Wiendahl* entwickelten Systematik der Wandlungsfähigkeit wird ein Wechsel eines Flexibilitätskorridors möglich durch Wandlungsbefähiger, welche infolge ihrer Eigenschaften eine gewünschte Veränderung der Fabrik bewirken können [Wiendahl et al. 2014, S. 132]. Diese sind Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität [Wiendahl et al. 2014, S. 133] und können in die drei Arten der räumlichen, organisatorischen und technischen Wandlungsfähigkeit eingeteilt werden [Hernández 2003, S. 57]. Für die Fabriklayoutplanung ist vor allem die räumliche Skalierbarkeit – die „Erweiter- und Reduzierbarkeit“ – relevant, welche die Freiheitsgrade der Objekte hinsichtlich Ausdehnung, Wachstum oder Schrumpfung umfasst [Hernández 2003, S. 55], entscheidend. Objekte, an denen ein Wandlungsprozess durchgeführt werden kann, werden als Wandlungsobjekte bezeichnet [Hernández 2003, S. 53].

Hernández und Wiendahl heben die frühzeitige Einbindung der Belange des Industriebaus und damit der Generalstruktur besonders hervor [Wiendahl et al. 2014, S. 131]. Diese Struktur unterstützt die Fabriklayoutplanung langfristige

Veränderungen, die einer Transformation² entsprechen, vorzubereiten [Hernández 2003, S. 74]. Für die Strukturierungsebene der Generalstruktur (nach *Eversheim und Schuh*, vgl. Kapitel 2.1) können diesbezüglich die Wandlungsobjekte Grundstück und Generalbebauung identifiziert werden (**Abbildung 2-4**).

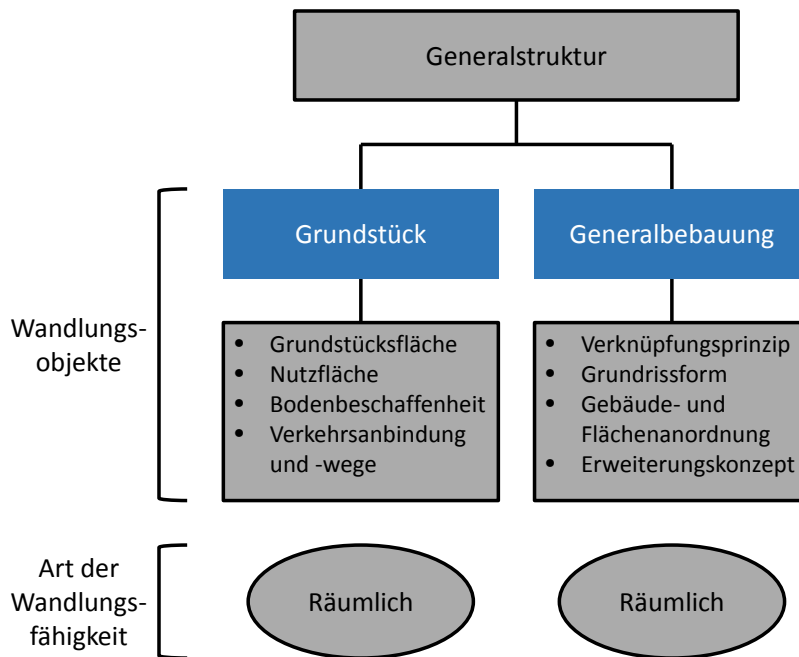


Abbildung 2-4: Wandlungsobjekte der Strukturierungsebene „Generalstruktur“ [in Anlehnung an Hernández 2003, S. 67]

Sowohl Grundstück als auch Generalbebauung lassen sich in weitere Wandlungsobjekte gliedern. Die Fabriklayoutplanung beeinflusst vor allem die Wandlungsobjekte Verkehrsanbindung und –wege, Grundrissform, Gebäudeanordnung und Erweiterungskonzept. Naturgemäß ist die dabei angestrebte Art der Wandlungsfähigkeit räumlich.

Das Ergebnis der Fabriklayoutplanung ist von besonderer Bedeutung, weil es als Grundlage aller weiteren Entscheidungen auf niedrigeren Strukturebenen dient. Im Besonderen trifft dies auf die Generalbebauungsplanung zu, welche aufgrund der langen Fabriklebenszyklen (vgl. Kapitel 2.1) den Charakter der zukünftigen Fabrik über Jahrzehnte prägt und die Wandlungsfähigkeit dauerhaft negativ oder positiv beeinflusst. Die tatsächliche Wandlungsfähigkeit der Fabrik zeigt sich während des

² Hier: Radikale Veränderung der ganzheitlichen Ordnung und Struktur eines Systems [Hernández 2003, S. 45]

Betriebs, da erst im weiteren Verlauf überhaupt erst die Notwendigkeit der Anpassung durch zukünftige Veränderungen erwächst.

Um Unsicherheiten bei der Planung zu berücksichtigen, kommen verschiedene Prognosetechniken zum Einsatz. Diese können in quantitative und qualitative Verfahren eingeteilt werden: Quantitative Verfahren sind zumeist Rechenverfahren, welche aufgrund empirischer Daten eine Entwicklungsprognose³ oder eine Wirkungsprognose⁴ durchführen. Qualitative Verfahren sind hingegen subjektive Beurteilungen zukünftiger Entwicklungen, wie beispielsweise simple Befragungen, historische Vergleiche oder auch komplexere Delphi-Studien. Quantitative Methoden können den Eindruck suggerieren, dass durch ihre mathematische Gestalt eine höhere Präzision erreicht wird, wohingegen qualitative Verfahren als fehleranfälliger angesehen werden können, jedoch ein umfassenderes Bild liefern.

Ein Ansatz, welcher beide Verfahren verbindet, ist das Szenario-Management⁵ [Vogel 2015, S. 11-13]. Da viele Variablen berücksichtigt werden können, eignet es sich besonders für längerfristige und strategischere Prognosen. Grundlage des Szenario-Managements ist die Einbeziehung mehrerer Möglichkeiten der Zukunftsentwicklung [Gausemeier et al. 1996, S. 83]. Dieser Denkansatz wird als multiple Zukunft bezeichnet und ist der Gegensatz zu fokussierten Ansätzen wie etwa der Fortschreibung aktueller Trends [Gausemeier et al. 1996, S. 85-86]. Eine zukunftsrobuste Planung beschreibt demnach einen Weg, welcher mehreren Szenarien gerecht wird [Gausemeier et al. 1996, S. 97]. Eine Kombination von Maßnahmen, die mehrere Szenarien unterstützt, wird als Robustplan bezeichnet [Gausemeier et al. 1996, S. 350]. Die Bezeichnung „robust“ hebt die Eigenschaft solcher Pläne hervor, gegenüber unerwünschten und nicht absehbaren Einflussgrößen unempfindlich zu sein und wird in der Automobilindustrie auch in anderen Bereichen, beispielsweise hinsichtlich der Prozessstabilität im

³ Zeitreihenanalyse nicht beeinflussbarer Variablen, bspw. Trendextrapolation oder Glättungsverfahren

⁴ Analyse kausaler Effekte beeinflussbarer Variablen, bspw. multivariante Regressionsanalyse oder Gap-Analyse

⁵ „Ein Szenario ist eine allgemeinverständliche Beschreibung einer möglichen Situation in der Zukunft, die auf einem komplexen Netz von Einflußfaktoren beruht. Ein Szenario kann darüber hinaus die Darstellung einer Entwicklung enthalten, die aus der Gegenwart zu dieser Situation führt.“ [Gausemeier et al. 1996, S. 90]

VDA-Standard „Robuster Produktionsprozess“ (RPP), verwendet [Weißbrich et al. 2008, S. 10]. Durch die Berücksichtigung mehrerer zukünftiger Entwicklungen ist das Szenario-Management sehr gut für die Planung und Beurteilung von Wandlungsfähigkeit geeignet.

Wiendahl et al. übertragen das Szenario-Management daher auf die Fabrikplanung, um Wandlungsfähigkeit planbar zu machen [Wiendahl et al. 2002]. Dazu werden Layouts für verschiedene Szenarien geplant und geeignete Maßnahmen abgeleitet, die den Weg zu mehreren Zukunftsbildern ermöglichen, und zu einem Gesamtplan zusammengefasst. Wandlungsfähige Fabrikstrukturen sind demnach das Ergebnis von „Robustplänen“, da sie mehrere Szenarien unterstützen, ohne diese gezielt vorzubereiten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Grundlage für ein wandlungsfähiges Fabriklayout früh gelegt wird, jedoch die Wandlungsfähigkeit erst spät in Anspruch genommen und somit überprüfbar wird. Voraussetzung für eine zukunftsrobuste Planung ist die Ausplanung und der Vergleich vieler Fabriklayoutvarianten unter Zuhilfenahme des Szenario-Managements, was ein entsprechendes Datenmanagement und Dokumentation erfordert.

Im Hinblick auf die einführend dargestellten Herausforderungen aufgrund der disruptiven Umbrüche in der Automobilindustrie wird somit die eindringliche Notwendigkeit deutlich, die Layoutplanung für die Zukunft mit den entsprechenden Werkzeugen auszustatten, so dass entsprechende „Robustpläne“ entwickelt werden können.

2.2.2 Layoutplanung im Fabrikplanungsprozess

Durch die zuvor beschriebene Komplexität der Fabrikplanung ist zur Steuerung und Koordination ein systematisches Vorgehen unumgänglich. Die Strukturierung der Planung wird daher zumeist durch eine Einteilung des Planungsumfangs in Planungsphasen vorgenommen (vgl. Kapitel 2.1).

Die Planungssystematiken folgen dem übergeordneten Prinzip „vom Groben zum Feinen“ und teilen den Planungsablauf in Planungsphasen mit ansteigendem

Detaillierungsgrad ein [Schmidt 1977, S. 86; Kettner et al. 1984, S. 13; Aggteleky 1987, S. 37; Wiendahl 1996, S. 9-11; VDI 5200 Blatt 1, S. 8; Grundig 2018, S. 46].

Abbildung 2-5 gibt eine Übersicht ausgewählter Fabrikplanungssystematiken.

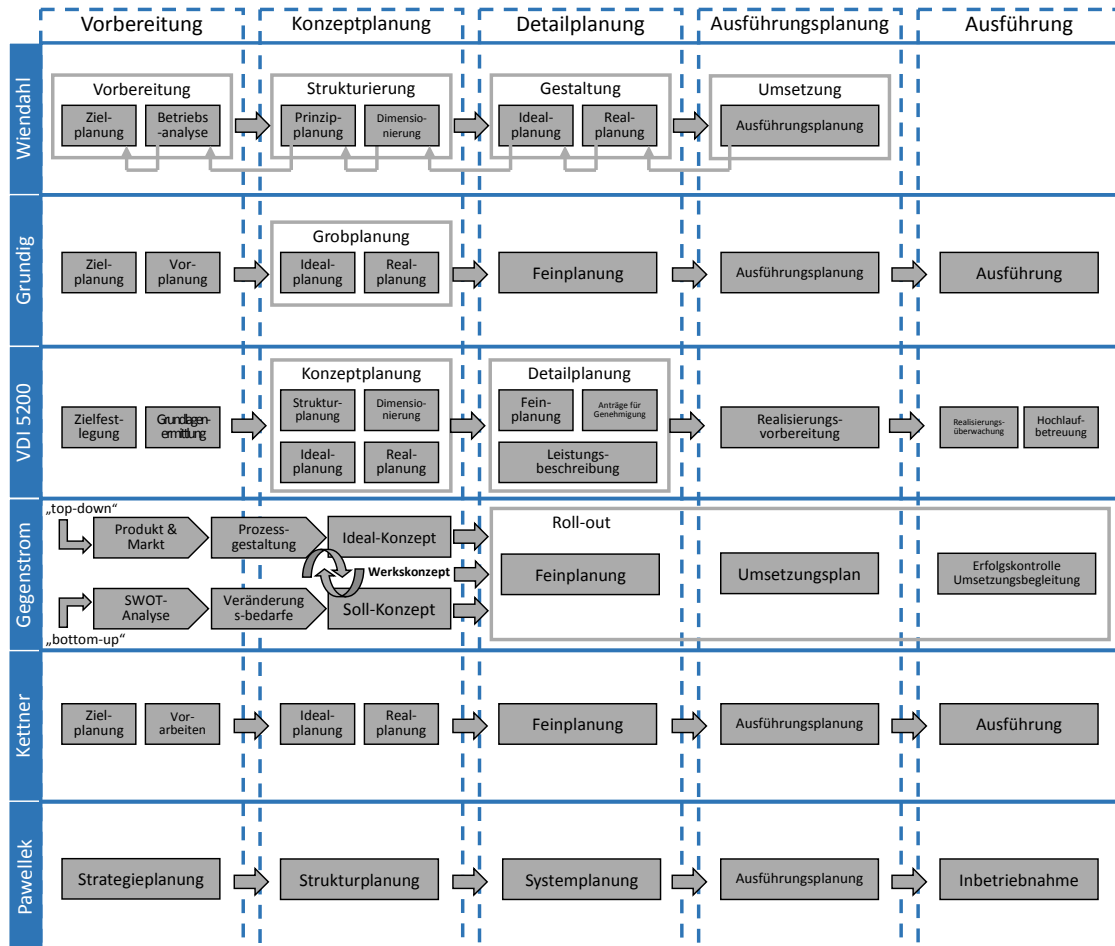


Abbildung 2-5: Übersicht Fabrikplanungssystematiken [in Anlehnung an Aurich et al. 2015, S. 192; Schuh et al. 2007, S. 196; VDI 5200 Blatt 1, S. 8-21; Wiendahl 1996, S. 9-11; Grundig 2018, S. 46; Kettner et al. 1984, S. 13; Pawellek 2014, S. 62]

Die unterschiedlichen Systematiken lassen sich in fünf grundsätzliche Abschnitte einteilen: Nach vorbereitenden Arbeiten führt das Planungsteam zunächst eine Konzept- bzw. Grobplanung durch, die nach Abschluss dieser Phase in eine Detail- bzw. Feinplanung erweitert wird. Die Ausführungsplanung dient der Vorbereitung der Realisierung des Planungsergebnisses, welches durch die Ausführung erreicht wird. Die Konzeptplanung wird auch als frühe Phase bezeichnet [Wirth et al. 2011, S. 799]. Sie zeichnet sich infolge der hohen Freiheitsgrade und unvollständiger Informationen durch besondere Anforderungen aus, die in Kapitel 2.2.4 näher betrachtet werden.

Die Gemeinsamkeiten verschiedener Systematiken vereint die *VDI 5200 Blatt 1*. Sie bildet in Wissenschaft und Praxis die Referenz und wird in vielen Forschungsansätzen und Industrieprojekten angewandt. Außerdem nimmt die Richtlinie eine Zuordnung der Planungsphasen zu den Leistungsphasen der Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (HOAI) vor, die in der Praxis eine bedeutende Rolle spielt, da sie die rechtliche Grundlage der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit in der Fabrikplanung bildet. Gerade in der Automobilindustrie werden viele Teilaufgaben der Planung an externe Dienstleister vergeben, während die Koordinationsfunktion meist beim OEM verbleibt. Aufgrund der Relevanz für die Fabrikplanung im Automobilbau wird sich daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit dieses Planungsverfahren bezogen.

Die *VDI 5200 Blatt 1* sieht das sequenzielle Durchlaufen der Planungsphasen vor [S. 8]. Aus Zeit- und Kostengründen wird jedoch in der Industrie zunehmend eine Parallelisierung der Planungsphasen vorgenommen [Bracht et al. 2018, S. 28] (**Abbildung 2-6**).

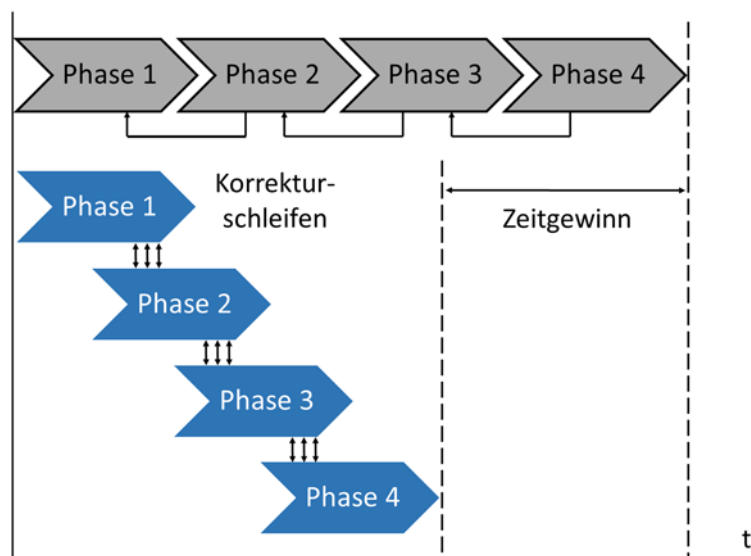


Abbildung 2-6: Prinzip der Parallelisierung

Während bei dem sequenziellen Vorgehen nur einzelne Iterationen vorgesehen sind, ist der Abstimmungsaufwand bei der Parallelisierung wesentlich höher und erfordert eine schnelle und eindeutige Datenweitergabe bzw. eine gemeinsame Datenbasis zur gleichzeitigen Nutzung. Hier auftretende Unstimmigkeiten hemmen

eine schnelle Planung und führen zu Problemen wie Informationsverlusten (vgl. Kapitel 2.5.2). Dem erhöhten Aufwand gegenüber steht ein entsprechender Zeitvorteil durch die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Phasen und eine höhere Planungsqualität durch die bessere Abstimmung. Diese Abstimmungsprozesse gilt es durch neue Werkzeuge zu unterstützen.

Beim Durchlaufen der Planungsphasen werden die Strukturierungsebenen der Fabrik in den jeweiligen Planungsebenen bearbeitet (vgl. Kapitel 2.1). Die Koordination und Zusammenführung dieser Ebenen kann nach den beiden Planungsgrundsätzen von „Innen nach Außen“ oder von „Außen nach Innen“ erfolgen.

Bei der Bearbeitung der Ebenen von „Innen nach Außen“ erfolgt zunächst die Planung des Arbeitsplatzes bzw. der Betriebsmittelstruktur. Davon ausgehend werden die höheren Ebenen aggregiert. Hier wird zunächst das Systemelement geplant und dann das umgebende System [Schmigalla 1995, S. 90; Schlange 2010, S. 55], welches wiederum ein Subsystem einer übergeordneten Planungsebene ist. Erfolgt die Planung von „Außen nach Innen“ werden zunächst Standort und Generalbebauung festgelegt und somit die Rahmenbedingungen der tieferliegenden Planungsebenen bestimmt [Müller et al. 2009, S. 119]. Diese Vorgehensweise legt dementsprechend zunächst die Umgebung und dann das System fest [Schmigalla 1995, S. 90; Schlange 2010, S. 55]. Tieferer Planungsebenen sind dabei als Subsysteme anzusehen. Im Planungsablauf werden die Planungsergebnisse in den jeweiligen Phasen dann weiter detailliert („vom Groben zum Feinen“).

Das Vorgehen von „Außen nach Innen“ wird angewendet, wenn übergeordnete Konzepte im Vordergrund der Planung stehen oder bestehende äußere Randbedingungen, wie beispielsweise ein Bebauungsplan, zwingend einzuhalten sind. Dieser Ansatz birgt das Risiko, dass durch höhere Planungsebenen Restriktionen festgelegt werden, die zu suboptimalen Kompromisslösungen auf tieferen Ebenen führen. Eine effiziente Gestaltung der Produktions- und Logistikprozesse kann dadurch verhindert und in der Folge eine gute Gesamtlösung verfehlt werden. Die Planung von „Innen nach Außen“ geht hingegen direkt von

Idealkonzepten der Betriebsmittelstruktur aus und aggregiert diese über die weiteren Ebenen. Dieses Vorgehen ist jedoch wesentlich komplexer und wird erst durch die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik ermöglicht und beherrschbar [Bracht et al. 2018, S. 32] (vgl. auch Kapitel 2.3).

Eine Kombination beider Planungsgrundsätze nutzt die Fabrikplanung im Gegenstromverfahren [Schuh et al. 2007], welche durch die gleichzeitige, iterative Verknüpfung einer „top-down“-Analyse aus Markt- und Produktsicht sowie einer „bottom-up“-Synthese das Fabrikplanungsvorhaben sowohl von „Innen nach Außen“ als auch von „Außen nach Innen“ bearbeitet (vgl. Abbildung 2-5). Ähnliche Konzepte sehen auch die kooperative Fabrikplanung [Wiendahl et al. 2001] und die synergetische Fabrikplanung [Reichardt und Pfeifer 2007] vor.

Die Fabriklayoutplanung wird in der Automobilindustrie ebenfalls kombiniert durchgeführt: Durch die Standortplanung wird ein Grundstück und folglich auch die externe Anbindung vorgegeben. Die Flächenbedarfe der Gewerke werden von diesen selbst ermittelt und zusammen mit anderen Daten für die Layoutplanung bereitgestellt. In der Fabriklayoutplanung werden dann auf Basis dieser Anforderungen und des spezifischen Zielfelds des Vorhabens Layoutvarianten gestaltet.

Die Layoutplanung wird in mehreren Phasen des Fabrikplanungsvorgehens durchgeführt. **Abbildung 2-7** zeigt die Einordnung der Layoutplanung in das Phasenmodell der VDI 5200 Blatt 1.

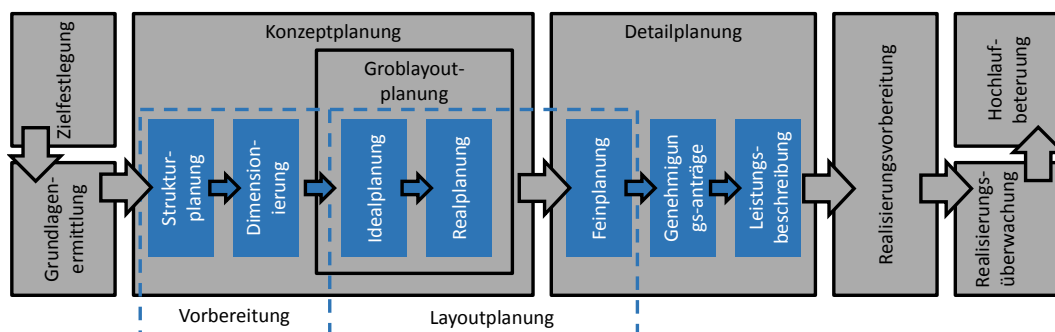


Abbildung 2-7: Einordnung der Layoutplanung in die Fabrikplanungsphasen [nach VDI 5200 Blatt 1, S. 12-16]

Als vorbereitende Schritte werden die Strukturplanung und die Dimensionierung durchgeführt. Die eigentliche Layoutplanung kann in die Grob- und die Feinlayoutplanung unterteilt werden. Durch die vielen Schnittmengen und Berührungspunkte mit anderen Fachbereichen und Wechselwirkungen der Strukturierungsebenen ist die Layoutplanung eine in hohem Maße kollaborative Aufgabe [Shariatzadeh et al. 2012, S. 299].

2.2.3 Ablauf der Layoutplanung

Der Prozess der Layoutplanung orientiert sich wie die Fabrikplanungsphasen ebenfalls an dem Prinzip „vom Groben zum Feinen“. Die Layouts lassen sich hinsichtlich Abstraktionsebene und inhaltlicher Detaillierung unterscheiden [Grundig 2018, S. 144]. Entsprechend dem in Abbildung 2-7 dargestellten Ablauf werden im Folgenden die einzelnen Schritte der Vorbereitung und der Groblayoutplanung erläutert. Dazu wird zunächst eine Einteilung der Typen von Layouts nach Planungsphase und -ebene vorgenommen (**Abbildung 2-8**).

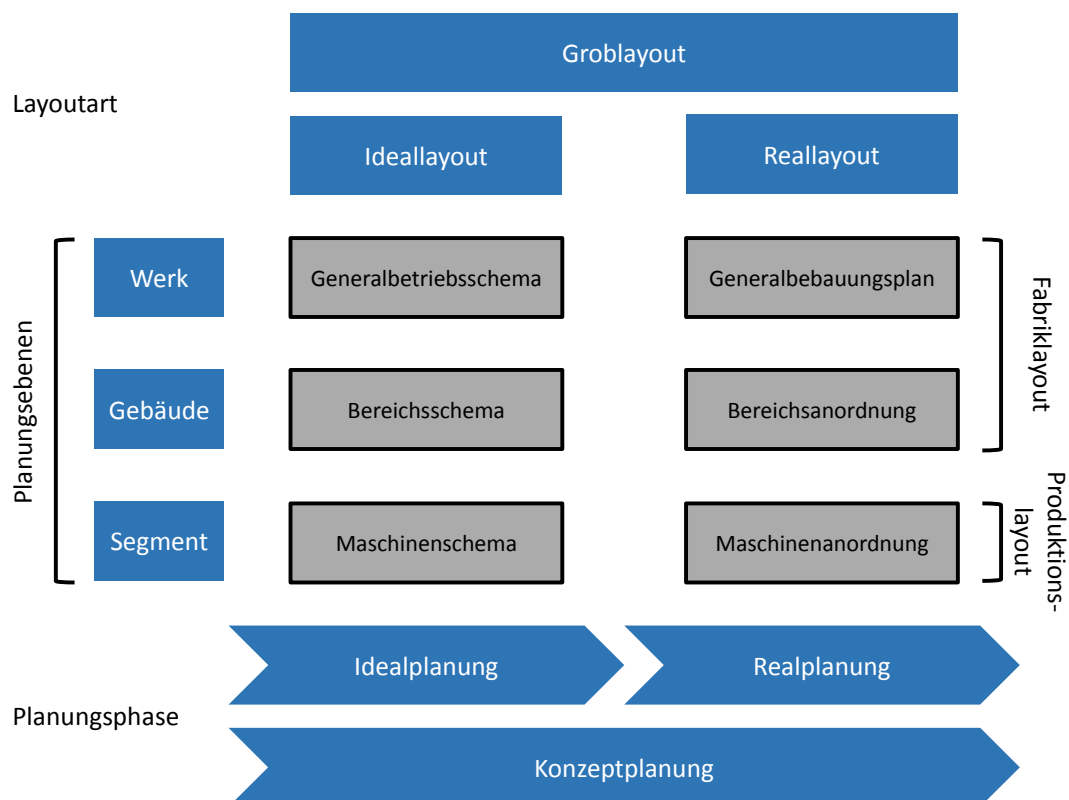


Abbildung 2-8: Typen von Layouts, eingeteilt nach Planungsphase und -ebene [in Anlehnung an Kettner et al. 1984, S. 126; Wiendahl et al. 2001, S. 189; Hernández 2003, S. 68; Grundig 2018, S. 143]

Die Konzeptphase wird auch als Grobplanung bezeichnet (vgl. Kapitel 2.2.2). Auf der Werksebene wird zunächst ein Gesamtbetriebsschema erarbeitet, welches in Generalbebauungsvarianten und dann durch Auswahl der Realisierungsvariante in einen Generalbebauungsplan überführt wird [Kettner et al. 1984, S. 126].

Zu der vorgenommenen Einteilung ist eine Abgrenzung zu Schenk und Wirth vorzunehmen: Diese unterscheiden abweichend zu den vorherigen Darstellungen drei hierarchische Ebenen der Layoutplanung (Generalbebauung, Groblayout und Feinlayout), welche in zwei Planungsphasen (Idealplanung und Realplanung) ausgestaltet werden [Wirth et al. 2000, S. 13-16; Schenk et al. 2014, S. 332-335]. Die grundsätzlichen Beschreibungen des Ablaufs und der Anforderungen der Layoutplanung sind hingegen übertragbar.

Bei der Erarbeitung von Layouts werden zunächst die Strukturplanung und die Dimensionierung als Vorarbeiten durchgeführt. Danach erfolgt die Planung eines Groblayouts, die zunächst als Ideal-, dann als Realplanung durchgeführt wird. Bei der Übertragung in das Feinlayout werden die Ergebnisse weiter detailliert und dadurch zu einem umsetzungsfähigen Plan ausgestaltet. Die Strukturierung, Dimensionierung und Groblayoutplanung sind im Fabrikplanungsvorgehen nach der *VDI 5200 Blatt 1* der Konzeptplanung zugeordnet; die Übertragung in ein Feinlayout erfolgt in der Detailplanung (vgl. Kapitel 2.2.2).

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte anhand der Fabriklayoutplanung eines Automobilwerks erläutert. Der Fokus liegt auf der materialflussgerechten Zuordnung der Nutzungsbereiche, der Anordnung der Bauten, der Gestaltung der Hauptverkehrswege und der Ver- und Entsorgungssysteme sowie der Erschließung des Werksgeländes. Die Ergebnisse liegen schließlich in Form von **Blocklayouts** vor, die nach Auswahl der bevorzugten Alternative in einen Generalbebauungsplan überführt werden [Eversheim und Schuh 1996, 9–61f.].

2.2.3.1 Strukturplanung

Die Strukturplanung orientiert sich an den Strukturierungsebenen der Fabrik nach *Eversheim und Schuh* (vgl. Kapitel 2.1). Zu den vier unteren Ebenen (General-,

Gebäude-, Bereichs-, Betriebsmittelstruktur) wird jeweils ein **Strukturkonzept** erstellt. Bei der **Generalstrukturplanung** bilden Gebäude die Elemente des Systems. In der Praxis wird die Strukturentwicklung als kreativer Prozess angesehen, zu dem es keine optimale Lösung gibt und der folgerichtig zu mehreren Varianten führt [Harms 2004, S. 21].

Bei der Entwicklung eines Layouts werden zunächst die anzuordnenden Elemente der jeweiligen Strukturierungsebene und ihre Beziehungen untereinander identifiziert. Die Beziehungen können dabei formeller oder informeller Art sein und gliedern sich in Informationsflüsse, Materialflüsse und Personalflüsse. Die Strukturierung kann anhand verschiedener Kriterien, wie Technologie, Produkte oder Märkte, erfolgen [VDI 5200 Blatt 1, S. 13]. Die **Abbildung 2-9** gibt eine typische Generalstruktur eines Automobilwerks wieder.

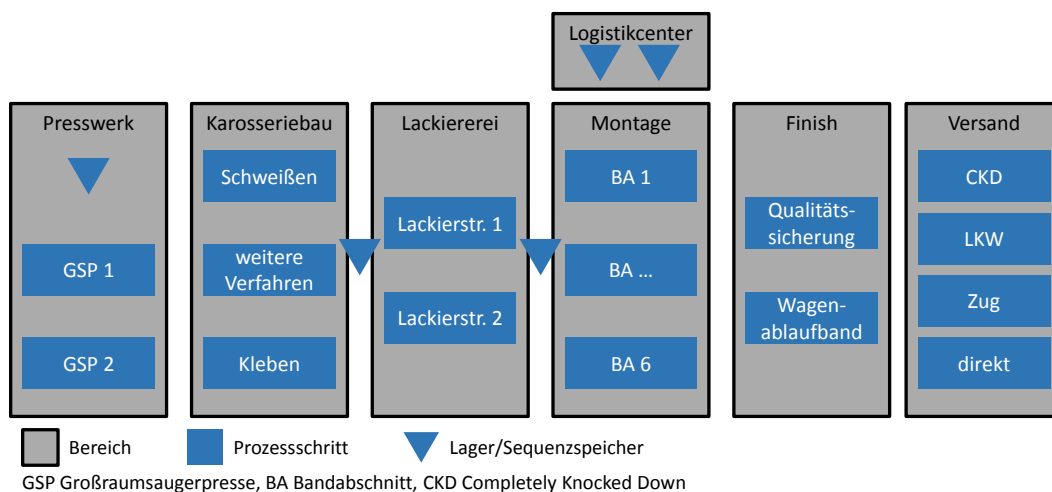


Abbildung 2-9: Generalstruktur am Beispiel eines Automobilwerks

In der Automobilindustrie orientiert sich die Strukturierung am Produktionsablauf. Es entsteht eine Gliederung in fünf Produktionsbereiche, die als Gewerke bezeichnet werden [Klug 2018, S. 19], sowie die Bereiche Logistikcenter und Versand. Diese grundlegenden Strukturen können nach Ergänzung um den indirekten Produktionsbereich, der Bürofläche, in ein ideales Funktionsschema überführt werden (**Abbildung 2-10**).

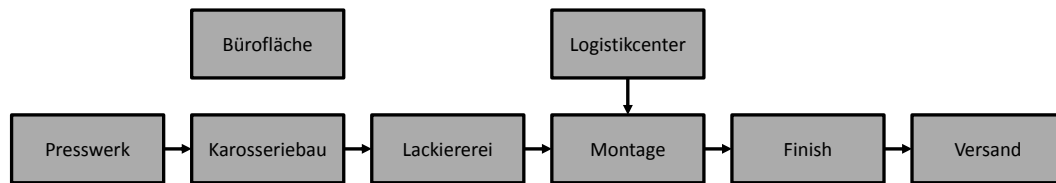


Abbildung 2-10: Ideales Funktionsschema eines Automobilwerks

Bei der idealen Darstellung werden die Strukturelemente unmaßstäblich als Flächenbereiche dargestellt und durch Pfeile verknüpft, welche die Materialflüsse darstellen [Wiendahl et al. 2014, S. 497].

2.2.3.2 Dimensionierung

Aus den erhobenen Daten werden die Kapazitäten und die jeweiligen Flächenbedarfe ermittelt [VDI 5200 Blatt 1, S. 13]. In der Automobilindustrie erfolgt dieser Schritt durch die jeweiligen Gewerke. Abhängig vom Szenario können hier mehrere Varianten notwendig sein, da beispielsweise verschiedene Technologien einen abweichenden Flächenbedarf aufweisen können (**Abbildung 2-11**).

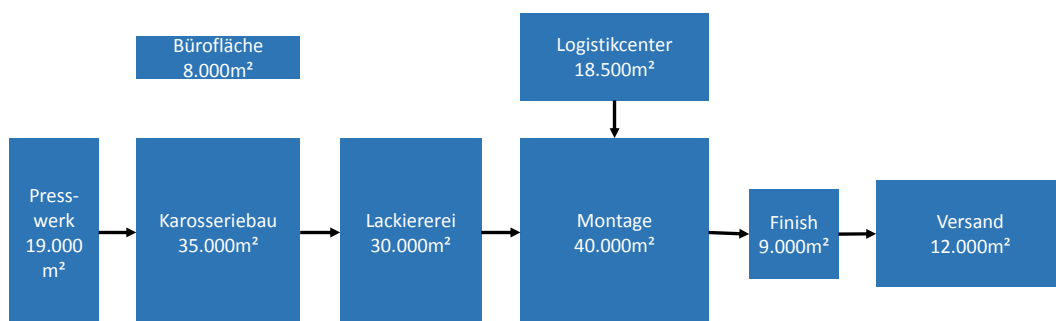


Abbildung 2-11: Flächenmaßstäbliches Funktionsschema eines Automobilwerks

Bei einem flächenmaßstäblichen Funktionsschema entspricht der Aufbau der idealen Darstellung, die Abbildung der Elemente erfolgt jedoch maßstabsgetreu [Wiendahl et al. 2014, S. 497]. Durch die Visualisierung der Größenverhältnisse ist eine erste grobe Orientierung der Möglichkeiten bei der folgenden Layoutplanung möglich. Das Funktionsschema ist somit die Vorstufe des Blocklayouts [Schenk et al. 2014, S. 341].

2.2.3.3 Groblayoutplanung

Die Ergebnisse der Dimensionierung werden in ein Blocklayout überführt. Im ersten Schritt, der Idealplanung, wird unter bewusster Auslassung von Restriktionen und Rahmenbedingungen eine optimale Lösung gesucht, welche in der folgenden Realplanung unter Berücksichtigung der gegebenen Beschränkungen zur Ableitung der Reallayouts dient [Müller et al. 2009, S. 119]. Auf Basis des Ideallayouts können die verschiedenen gebildeten Varianten des Reallayouts objektiv bewertet und miteinander verglichen werden [Kettner et al. 1984, S. 126] (**Abbildung 2-12**).

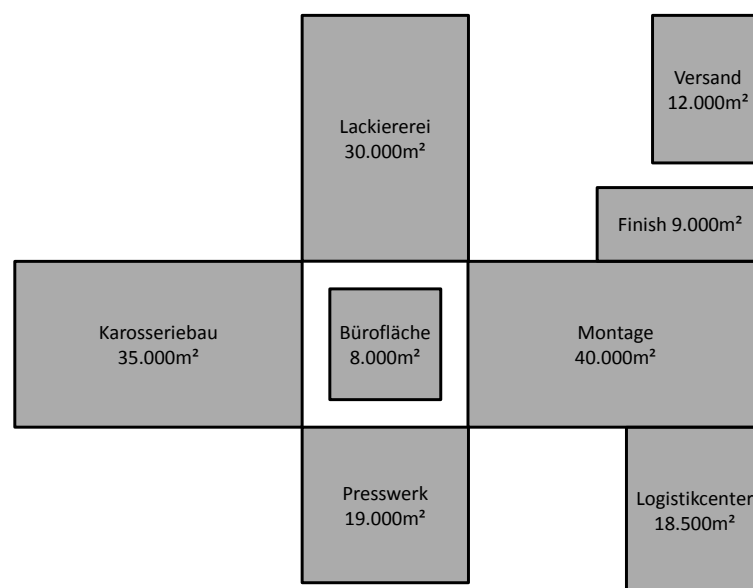


Abbildung 2-12: Beispiel für ein ideales Blocklayout eines Automobilwerks [in Anlehnung an Maurer und Stark 2001, S. 11]

Die Flächen des Funktionsschemas werden zueinander angeordnet, so dass unter Beibehaltung des zuvor erarbeiteten Konzepts eine gute Lage der Flächen zueinander erreicht wird. Bei der Generalbebauungsplanung sind hier die drei Hauptzielsetzungen langfristige Sicherstellung guten Gesamtproduktionsflusses, gute Flächennutzung und gute Erweiterungsmöglichkeiten maßgeblich (vgl. Kapitel 2.1). Wesentliche Gestaltungsmerkmale sind die Einteilung von Funktionszonen mit Raster und Festlegung der Haupttransportachsen [Kettner et al. 1984, S. 132] sowie die Erarbeitung eines Erweiterungskonzepts und die Festlegung von Baustufen [Kettner et al. 1984, S. 154].

Bei der Entwicklung eines Reallayouts wird zunächst versucht, die Ideallösung innerhalb der real zur Verfügung stehenden Flächen umzusetzen. Hierzu wird das durch die Standortplanung bestimmte Grundstück mit dem idealen Fabriklayout überlagert. Aufgrund der Grundstücksgeometrie ergibt sich dadurch in den wenigsten Fällen eine realisierbare Lösung und eine Umordnung der Flächen, Bereiche und Gebäude wird notwendig [Grundig 2018, S. 153].

Im Zuge dieses Anpassungsprozesses im Reallayout werden die vorliegenden Restriktionen unter Beibehaltung der grundlegenden Eigenschaften des Idealkonzepts, wie etwa der Haupttransportachsen, sukzessive einbezogen. Kann durch diesen Anpassungsprozess keine Lösung erzielt werden, muss geprüft werden, ob die Dimensionierung der Elemente unter Beibehaltung der Flächengrößen geändert werden kann. Ziel ist es, eine ausgewogene Flächenbilanz zwischen der Summe der Flächenbedarfe der Ideallösung und der im Reallayout beplanten Grundstücksfläche zu erzielen [Grundig 2018, S. 155]. Abweichungen bedeuten entweder eine suboptimale Flächennutzung oder die Notwendigkeit weiterer Anpassungen.

Die zur Verfügung stehende Grundstücksfläche kann nur in den wenigsten Fällen, etwa durch den Zukauf von Optionsflächen, erweitert werden. Stattdessen muss dann geprüft werden, ob in niedrigeren Planungsebenen Möglichkeiten bestehen, Flächenbedarfe etwa durch den Austausch von Anlagen zu verringern oder durch eine Vergrößerung der Bauhöhe, innerhalb der zulässigen Grenzen, zu befriedigen.

Bei der Realplanung ist zu beachten, dass mehrere Varianten ausgeplant werden müssen. Wichtig ist dabei, dass im Sinne der Wandlungsfähigkeit zu den im Vorfeld ermittelten Szenarien eine sinnvolle Anzahl an Varianten erarbeitet wird, um entsprechende „Robustpläne“ ableiten zu können (vgl. Kapitel 2.2.1). Hierdurch werden gute Vergleichsmöglichkeiten generiert, um die Planung auf einem hohen Qualitätsniveau abzusichern und eine Vorzugsvariante bestimmen zu können. Die Erhöhung der Variantenanzahl kann somit die Planungsqualität steigern, muss jedoch durch ein entsprechendes Datenmanagement unterstützt werden (vgl. Kapitel 2.3.2). Da in der Grobplanung Grundsatzentscheidungen getroffen werden [Dombrowski et al. 2017, S. 765], welche den gesamten weiteren Planungsprozess

entscheidend prägen, ist an dieser Stelle eine besondere Aufmerksamkeit gefragt. In der sich anschließenden Feinlayoutplanung werden die Grobpläne der jeweiligen Planungsebenen zu Ausführungsplänen weiterentwickelt.

Die Ergebnisse werden parallel in den Planungsabteilungen der Gewerke besprochen und mit den jeweiligen Anforderungen verglichen. Das Ergebnis dieser Prüfung kann Anpassungen notwendig machen, welche in Form von Änderungen in der Struktur oder Dimensionierung in die Layoutplanung einfließen müssen. Je nach Komplexität der Planung können weitere Iterationen dieses Vorgangs notwendig werden. Durch diese häufigen Änderungen und die Parallelisierung ist der Abstimmungsbedarf entsprechend hoch und muss durch geeignete Werkzeuge unterstützt werden.

2.2.4 Layoutplanung in der frühen Phase

Planer müssen in der frühen Phase, unter welcher insbesondere die Konzeptplanung zu verstehen ist (vgl. Kapitel 2.2.2), besondere Herausforderungen bewältigen, welche in diesem Kapitel erläutert werden.

Die Anforderung an die Layoutplanung sind sehr vielfältig und können in zwei Kategorien eingeteilt werden: Zum einen werden an den Planungsvorgang an sich Anforderungen gestellt, welche unter anderem die Datenqualität (vgl. Kapitel 2.3) oder die Benutzbarkeit des Werkzeugs (vgl. Kapitel 2.4) betreffen können. Zum anderen müssen inhaltliche Anforderungen an das Planungsergebnis erfüllt werden, welche einerseits die Zielfelder der Fabriklayoutplanung (vgl. Kapitel 2.2.1) und andererseits die Besonderheiten der frühen Phase betreffen. Diese werden im Folgenden dargestellt.

Allgemein ist es in Fabrikplanungsprojekten nicht möglich, eine objektiv beste Lösung zu finden, da theoretisch eine unbegrenzte Zahl an Lösungen existiert [Bracht et al. 2018, S. 28]. Während in der Detailplanung bzw. Produktionslayoutplanung Simulationsmethoden [Grundig 2018, S. 222], mathematische Anordnungsverfahren [Schenk et al. 2014, S. 326] oder kombinierte Verfahren [Bracht et al. 2017] zur Unterstützung genutzt werden, ist die

Fabriklayoutplanung in der frühen Phase eine sehr kreative Planung, die wesentlich stärker von der Erfahrung der Planer abhängig ist.

Sowohl mathematische Verfahren als auch die Simulation benötigen präzise und umfangreiche Daten, um angewendet werden zu können. Darunter fallen beispielsweise Transportmatrizen, Bearbeitungszeiten und Wegelängen. Diese Informationen fehlen in der Groblayoutplanung noch und werden erst im weiteren Planungsablauf erarbeitet. Die Layoutplanung in der frühen Phase ist dementsprechend geprägt von vielen Freiheitsgraden, einem großen Lösungsraum und beschränkten Informationen.

Die Fabrikstrukturplanung wird daher auch als innovativer Schwerpunkt der Fabrikplanung betrachtet [Grundig 2018, S. 42]. Die vielen unterschiedlichen Ideen und Lösungen, die in dieser Phase möglich sind, müssen verglichen und bewertet werden, um eine zukunftsrobuste Planung zu gewährleisten (vgl. Kapitel 2.2.1). Dies ist aufgrund der Komplexität nur als Teamleistung der Fachbereiche erreichbar [Schmigalla 1995, S. 201].

Dazu sind aufeinander abgestimmte Planungsmethoden und -werkzeuge erforderlich. Diese sichern die Kompatibilität und Weiterverwendung von Daten und Informationen und ermöglichen somit die Planung mehrerer Varianten in kürzerer Zeit [Bracht et al. 2018, S. 65; Marczinski 2004, S. 668-669].

Zusammengefasst ist die Fabriklayoutplanung in der frühen Phase ein sehr kreativer Prozess mit vielen Wechselwirkungen und hoher Komplexität, welcher Kenntnisse unterschiedlichster Fachdisziplinen benötigt. Dies führt zu der Notwendigkeit des Einsatzes der Digitalen Fabrik (Kapitel 2.3) und entsprechender intuitiver Werkzeuge zur Einbeziehung verschiedener Planer (Kapitel 2.4).

2.3 Digitale Fabrik

Innerhalb der Fabrikplanung nimmt die Digitale Fabrik eine besonders herausragende Rolle ein. Sie bildet die Basis für die ganzheitliche Planung von Fabrik, Produktion und Produkt und ermöglicht die umfassende Unterstützung, die

durch Parallelisierung (vgl. Kapitel 2.2.2) und iterative Abstimmungsprozesse (vgl. Kapitel 2.2.3) notwendig ist.

Die Grundlagen der Digitalen Fabrik entwickelten sich in den 1990er Jahren aus dem Ansatz des Computer Integrated Manufacturing (CIM), welcher den Erwartungen nicht gerecht wurde und sich nicht durchsetzte, da einerseits die technischen Voraussetzungen noch nicht weit genug waren und andererseits die organisatorischen Rahmenbedingungen vernachlässigt wurden [Reinhart et al. 2006, S. 4]. Die ursprüngliche Vision (enorme Steigerung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens durch rechnerunterstützte Integration der Betriebsabläufe und Informationsflüsse) und die Ziele des CIM (Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch Flexibilität, Erhöhung der Produktivität, Humanisierung der Arbeitswelt) [Schulz 1990, S. 1] blieben dabei erhalten und wurden zu der digitalen Abbildung sämtlicher Elemente und Prozesse einer Fabrik weiterentwickelt [Wiendahl 2002a, S. 121].

2.3.1 Definition

Nach vielen Beschreibungsansätzen definiert die VDI 4499 Blatt 1 die Digitale Fabrik schließlich wie folgt [VDI 4499 Blatt 1, S. 3]:

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.

Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“

Die Vielzahl der in der Digitalen Fabrik genutzten Methoden kann nach *Bracht et al.* in verschiedene Methodenklassen eingeteilt werden [Bracht et al. 2018, S. 86-87]. Die für die Fabriklayoutplanung in der frühen Phase relevanten Klassen sind insbesondere die Methoden der Kollaboration sowie die Darstellungs- und Gestaltungsmethoden.

Der Einsatz der Digitalen Fabrik als Planungsansatz erfolgt dabei zeitlich vor der Realisierung der Ergebnisse und zielt darauf ab, die Fabrik virtuell abzubilden und zu testen, bevor sie errichtet wird [Grundig 2018, S. 29]. Der Fokus liegt dabei auf einer frühzeitig und sorgfältig abgestimmten Produktionsplanung und Gestaltung der Fabrik (**Abbildung 2-13**).

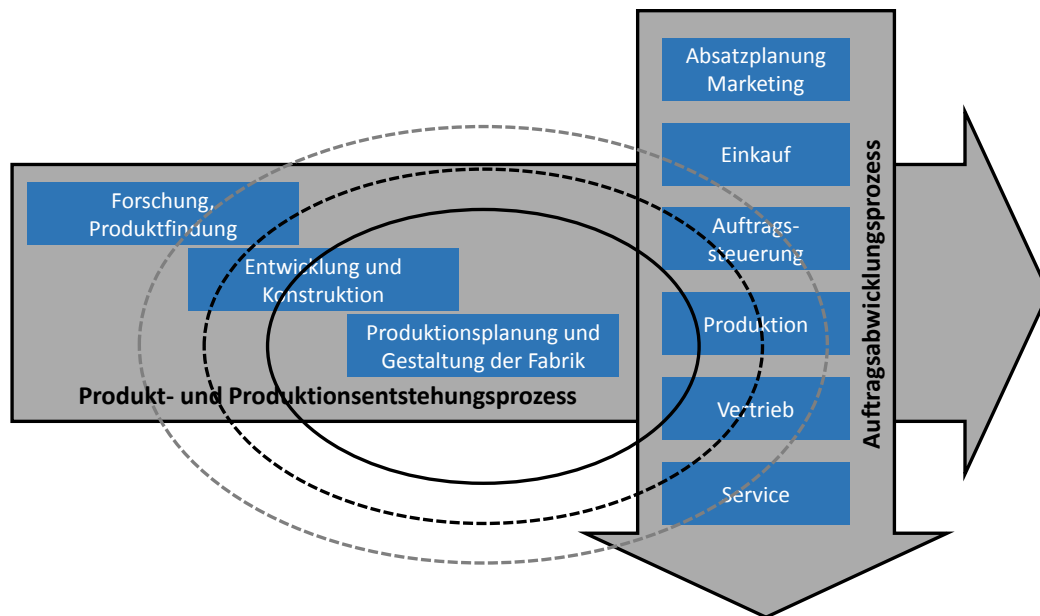


Abbildung 2-13: Fokus der Digitalen Fabrik [nach VDI 4499 Blatt 1, S. 3]

Basis der Abstimmung, Harmonisierung und Optimierung verschiedener Planungsprozesse ist die logisch-zentrale und konsistente Datenhaltung, wodurch die Digitale Fabrik schon seit ihrem ersten Aufkommen als Informationsdrehscheibe im gesamten Planungsprozess fungiert [Marczinski 2004, S. 666] sowie als Bindeglied und Integrator zwischen Produktentwicklung, Planung und Produktion betrachtet wird [Bracht et al. 2005a, S. 10]. Erst die Weiterverwendung von digitalen Planungsdaten zwischen diesen Bereichen ermöglicht eine beschleunigte, parallelisierte Planung [Bracht et al. 2018, S. 71] (siehe auch Kapitel 2.2.2). Die Digitale Fabrik ist damit eine wesentliche Querschnittsfunktion im Unternehmen, die den Planungsprozess über alle Planungsphasen und in allen Bereichen unterstützt und die Kooperation und Kollaboration der Beteiligten fördert (vgl. Kapitel 2.1).

Eine frühzeitige digitale Planung ist der Ausgangspunkt für den Einsatz vieler weiterer digitaler Methoden und Werkzeuge im späteren Planungsprozess. Mittels Frontloading, also der Verschiebung des Arbeitsaufwandes nach vorne im Sinne einer vorausschauenden und umfangreichen Planung, werden Fehler, Nacharbeit und Änderungen verringert. Durch die gezielte Einbeziehung der Anforderungen nachfolgender Planungsphasen wird die spätere Planung optimiert [Dombrowski 2015, S. 116].

Um dies zu erreichen, müssen Planungsergebnisse möglichst früh und direkt als 3D-CAD-Modell vorliegen. Dies ist nicht nur eine Grundlage für den Erfolg des Einsatzes der Digitalen Fabrik, sondern erlaubt darüber hinaus ein zentrales Datenmanagement sowie die einfache Wiederverwendung von Planungsobjekten in unterschiedlichen Layouts und reduziert den Aufwand beim Einsatz anderer, im weiteren Planungsverlauf zum Einsatz kommenden Technologien, wie etwa Virtual Reality oder Materialflusssimulation [Bracht und Reichert 2010, S. 66-67].

Durch die bessere Komplexitätsbeherrschung und die weitergehenden Abstimmungsmöglichkeiten durch den Einsatz digitaler Werkzeuge kann die Entwicklung der Fabrik heute stärker „von Innen nach Außen“ erfolgen [Bracht et al. 2018, S. 32] (vgl. auch Kapitel 2.2.2).

Wesentlicher Vorteil der Digitalen Fabrik ist die Steigerung der Planungsqualität in verkürzter Zeit. Dies äußert sich in der Reduzierung von Planungsfehlern um bis zu 70 % und der gleichzeitigen Senkung der Planungszeit um bis zu 30 % [Bracht et al. 2013b, S. 24].

2.3.2 Datenmanagement

Um der Querschnittsfunktion der Digitalen Fabrik gerecht zu werden, bedarf es entsprechender Werkzeuge und eines darauf abgestimmten Datenmanagements. Für die im Planungsablauf sehr früh liegende Fabriklayoutplanung bedeutet dies, dass Ergebnisse und Datenaufbereitung an die durchgängige Weiternutzung durch die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik angepasst sein müssen. Hierzu müssen etwa die Datenformate der eingesetzten CAD-Systeme untereinander kompatibel sein und einem standardisierten Aufbau entsprechen. Es kann

festgehalten werden, dass nicht der Grad der Digitalisierung, sondern der Grad der Durchgängigkeit der Planungsdaten – im Sinne der Versorgung weiterer Beteiligter mit Daten – entscheidend ist [Quasdorff 2016, S. 57]. Folgerichtig wird die Isolation eines IT-Systems als das größte Hemmnis zu seiner Verbreitung in der Digitalen Fabrik angesehen [Schallow et al. 2014, S. 142].

Die angestrebte digitale Durchgängigkeit wird durch ein entsprechendes Datenmanagement ermöglicht [Bracht et al. 2018, S. 175]:

„Ein durchgängiges Datenmanagement ist durch einen medienbruchfreien Datenaustausch zwischen allen Anwendungsprogrammen gekennzeichnet. Die technische Umsetzung der Durchgängigkeit kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen.“

Das Auftreten von Medienbrüchen, also der Wechsel des Mediums bei der Übertragung von Daten, führt zu langsamen Prozessen, Intransparenzen und einer erhöhten Fehlerwahrscheinlichkeit [Fleisch et al. 2003, S. 29]. Grundvoraussetzung um die Ziele der Digitalen Fabrik erreichen zu können, ist es daher, alle Planungsdaten in jeder Phase allen Planern redundanzfrei, aktuell und richtig zur Verfügung zu stellen [Petzelt et al. 2010, 131].

Dies entspricht der Vision des idealen Datenmanagements. Es beschreibt den Datenzugriff auf einen nicht redundanten und zentral verwalteten Datenbestand, welcher durch eine Zugriffskontrolle vor unautorisiertem Zugriff geschützt wird und durch seine Architektur das Andocken weiterer Module erlaubt [Bracht et al. 2005b, S. 197], was über die syntaktischen Interoperabilität der Systeme im Planungsprozess erreicht wird.

Die syntaktische Interoperabilität, also die Sicherstellung der technischen Voraussetzungen zur Zusammenarbeit [Bracht et al. 2018, S. 184; Wenzel et al. 2005, 338f.] im Sinne eines medienbruchfreien Datenaustausches, kann dabei entweder durch die Konvertierung von Daten oder durch eine gemeinsame Datenbasis mit standardisierten Datenformaten geschaffen werden. Im Falle der Konvertierung von Daten fällt ein hoher Aufwand im Prozess des digitalen

Workflows an, bei welchem zudem nicht immer sichergestellt werden kann, dass alle vorliegenden Daten ohne Informationsverlust konvertiert werden können. Gleichzeitig erhöht die uneinheitliche Speicherung das Risiko redundanter und inkonsistenter Daten [Schallow et al. 2014, S. 143].

Eine Verbindung verschiedener Anwendungen durch eine gemeinsame Datenbasis bietet sich aufgrund des erhöhten Aufwandes vor allem bei umfangreichen und komplexen Datenstrukturen an. In der Automobilindustrie mit ihren umfassenden, digitalen Planungsprozessen hat dies dazu geführt, dass schon früh umfangreiche Fabrikplanungssysteme entwickelt wurden, welche durch eine zentrale Datenhaltung und abgestimmte digitale Workflows verschiedene Anwendungen zusammenführen [Schäfer und Bracht 2018, S. 611]. Voraussetzung dafür ist ein modulares System mit standardisierten Arbeitsweisen [Engel et al. 2010, S. 178]. Beispiele für diese Systeme, welche im Kapitel 2.5.1 näher dargestellt werden, sind etwa das Hallen-Layout-System (HLS) der Volkswagen AG [König 2013, S. 47-50] oder das Fabrikplanungs- und Informationssystem (FAPLIS) der Daimler AG [Faber und Bracht 1988, S. 320-323].

2.3.3 Digitale Layoutplanung

Grundlage für die erfolgreiche Einführung und Nutzung der Digitalen Fabrik ist die Fabrikplanung mit 3D-CAD-Systemen [Bracht und Reichert 2010, S. 65]. Der konsequente Einsatz dieser Systeme fängt dabei schon mit der Layoutplanung an. Die durch die Fabriklayoutplanung erzeugten Layouts dienen im weiteren Planungsverlauf unter anderem als Grundlage für die Modelle des Industriebaus (**Abbildung 2-14**).

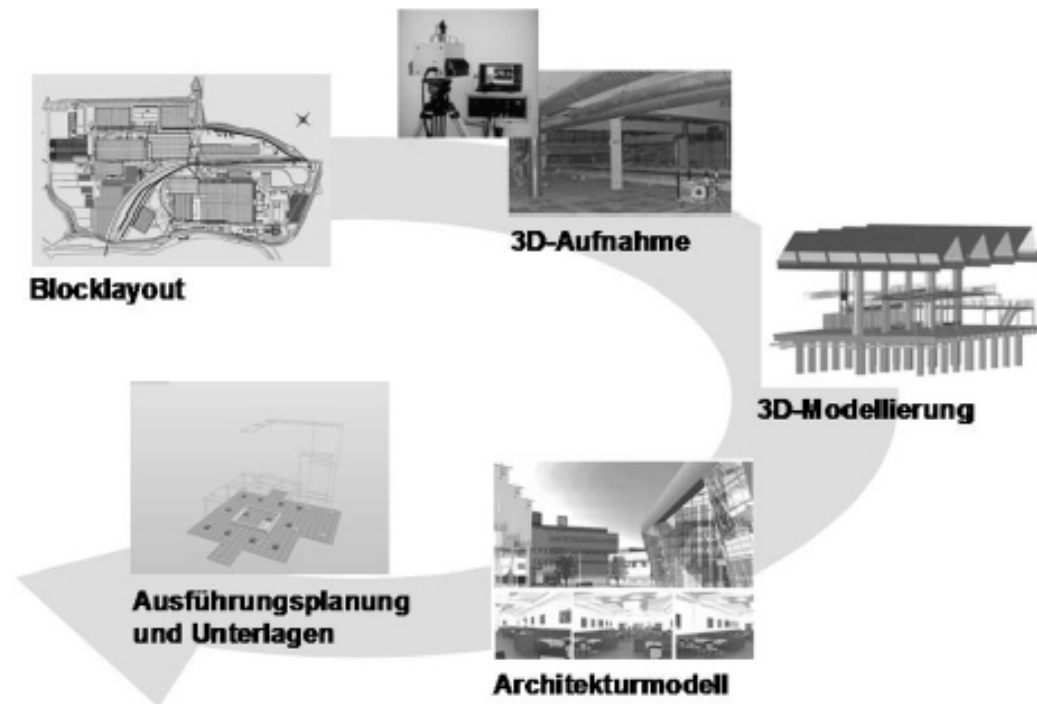


Abbildung 2-14: Nutzung digitaler Modelle für die Planungsstationen im Industriebau [Bracht et al. 2018, S. 260]

Ausgehend von einem digitalen Blocklayout, welches zuvor von einem idealen 2D- zu einem idealen 3D-Groblayout [Wiendahl et al. 2014, S. 498-500] erweitert wird, entsteht das 3D-Modell der Fabrik. Dieses wird gemeinsam mit dem Architekturmodell schließlich in die Ausführungsplanung überführt. Bei Umlanungen werden nach Bedarf, Datenlage und Wirtschaftlichkeit 3D-Aufnahmen der bestehenden Fabrik einbezogen. **Tabelle 2-2** stellt mögliche Detaillierungsstufen der 3D-Layoutplanung dar.

Tabelle 2-2: Detaillierungsstufen der 3D-CAD-Layoutplanung [in Anlehnung an Knobel et al. 2004, S. 218]

Detaillierungsstufe	Ergebnis	Ziel
Grobplanung	Grobes 3D-CAD-Layout	Erste Reservierung des notwendigen Platzbedarfs
Feinplanung	Detailliertes 3D-CAD-Layout	Genauere Platzbedarfsbestimmung (Anordnung)
Anlaufphase	3D-VR-Modell	Detaillierte, realitätsnahe Darstellung / Präsentation des letzten Planungsstandes

Der Ablauf der digitalen Layoutplanung orientiert sich an dem zuvor dargestellten Prinzip „vom Groben zum Feinen“ (vgl. Kapitel 2.2.2). Möglich ist dabei sowohl eine Vorgehensweise von „Innen nach Außen“, ausgehend von einzelnen Elementen, als auch von „Außen nach Innen“, wie etwa durch die Festlegung der Grundstücksstruktur. Auch eine Kombination beider Vorgehensweisen im Gegenstromverfahren ist möglich. Zur Visualisierung und Überprüfung können die Planungsergebnisse im letzten Schritt in ein 3D-Modell überführt werden (**Abbildung 2-15**).

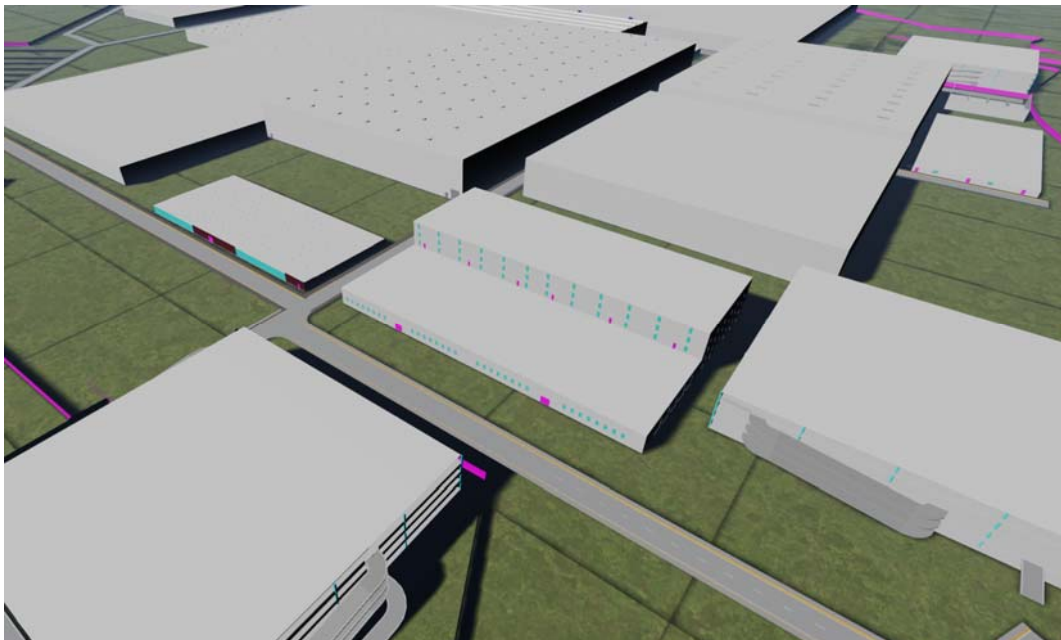


Abbildung 2-15: 3D-Modell einer Generalbebauungsplanung zur VR-Darstellung

Durch die frühzeitige digitale Layoutplanung entstehen Zeit- und Qualitätsvorteile durch Frontloading. Gleichzeitig ermöglicht sie eine vielfältige

Weiterverwendung der Planungsergebnisse in anderen digitalen Systemen. So kann ein digitales Layout als Basis für die Simulation [Wurdig und Wacker 2008] oder das Fabrik-DMU [Bracht et al. 2012] dienen. Weiterhin nutzen die unter dem Werk (vgl. Tabelle 2-1) liegenden Planungsebenen die jeweils höhere Ebene als Referenz, so dass das Fabriklayout Basis und Bezugspunkt aller weiteren Layouts, wie der Gebäude- oder Anlagenplanung, ist.

Die Layouts können auch bei Umplanungen oder bei neuen Projekten als Vorlagen wiederverwendet werden. Dies wird durch Fabrikplanungssysteme unterstützt, welche die einzelnen Pläne nach dem zuvor beschriebenen Muster untereinander referenzieren. Die Referenzierung von Daten in einen anderen Plan erzeugt eine dynamische Kopie. Es entsteht also kein zweiter, redundanter Datensatz, sondern ein Abbild, welches sich bei Änderung des Originals automatisch aktualisiert.

Es liegen somit in einzelne Elemente teilbare Modelle vor, die bei einem neuen Planungsfall entsprechend kombiniert werden können. Diese Modelle können auch systematisiert abgelegt werden, wodurch eine Bibliothek entsteht, welche die Effizienz der Planung noch einmal steigert [Bracht et al. 2018, S. 73]. In der Fabriklayoutplanung können somit in kürzerer Zeit verschiedene Varianten entwickelt und die Ergebnisqualität erhöht werden [Bracht et al. 2018, S. 72]. Bei der Unterstützung früher Planungsphasen durch die Digitale Fabrik kann jedoch ein Defizit identifiziert werden [Spillner 2012, S. 65] (vgl. auch Abbildung 2-19). Um die beschriebenen Vorteile zu realisieren, muss demnach der Einsatz der Digitalen Fabrik bei der frühen Fabriklayoutplanung intensiviert werden. Für diesen Zweck sind entsprechende Werkzeuge zu entwickeln.

2.4 Intuitive Planung

In diesem Kapitel wird ein einheitliches Verständnis einer intuitiven Planung erarbeitet. Dazu werden zunächst die allgemeinen Definitionen zur Intuition, Intuitivität und intuitiven Bedienbarkeit dargestellt und voneinander abgegrenzt. Im Anschluss wird eine Definition der intuitiven Planung abgeleitet und der Zusammenhang mit der partizipativen Planung erläutert.

2.4.1 Intuition, Intuitivität und intuitive Benutzbarkeit

Allgemein ist unter dem Begriff der Intuition „das unmittelbare, nicht diskursive, nicht auf Reflexion beruhende Erkennen, Erfassen eines Sachverhalts oder eines komplizierten Vorgangs“ bzw. eine „Eingebung“ oder „plötzliches, ahnendes Erfassen“ [Duden 2019a; Duden 1999, S. 1972] oder ein „spontanes geistiges Erfassen, auf Wissen und Erfahrung beruhend“ [Klappenbach und Steinitz 1969, S. 1973], zu verstehen. Das Adjektiv „intuitiv“ bedeutet entsprechend „auf Intuition beruhend“ [Klappenbach und Steinitz 1969, S. 1973] bzw. „mit Intuition erfolgend“ oder „Intuition besitzend“ [Duden 2019b].

In der Psychologie existieren verschiedene Definitionen von Intuition. *Dane und Pratt* identifizieren in ihrer Literaturstudie Gemeinsamkeiten bei den Beschreibungsansätzen, welche in vier Merkmale eingeteilt werden können: unbewusste Informationsverarbeitung, holistische Assoziationen, Affekt und Geschwindigkeit [Dane und Pratt 2009, S. 3]. Zusammengefasst kann Intuition somit als sehr schnell und unbewusst ablaufender Denkprozess aufgefasst werden, welcher auf implizites Wissen (vgl. Kapitel 2.4.3) zurückgreift. Dieser Prozess funktioniert assoziativ und holistisch, d.h. es entsteht spontan ein umfassendes Bild und ein ganzheitliches Urteil zu einem Sachverhalt [Dehne-Niemann 2013, S. 25]. Durch die holistische Sichtweise ist es zudem möglich, Erfahrungen aus einem Bereich auf ähnliche Probleme in einem anderen Bereich zu übertragen [Shapiro und Spence 1997, S. 65]. Intuition ist damit ein Gegenstück zu einem lang andauernden analytischen Entscheidungsprozess, welcher sich auf die Auswertung vieler Details und vorliegenden expliziten Wissens konzentriert. Durch die Einbeziehung impliziten Wissens und der holistischen Betrachtungsweise mit dem bereichsübergreifenden Austausch ist die intuitive Entwicklung zudem im besonderen Maße für die Erarbeitung von Konzepten durch Entscheidungsträger in der frühen Planung geeignet.

Im technischen Sinne wird Intuition auf die intuitive Benutzung oder intuitive Bedienbarkeit eines Systems bezogen. Dies wird als Intuitivität bezeichnet und wurde durch die *IUUI Research Group* wie folgt definiert [Mohs et al. 2006, S. 80]:

„Ein technisches System ist im Rahmen einer Aufgabenstellung in dem Maße intuitiv benutzbar, in dem der jeweilige Benutzer durch unbewusste Anwendung von Vorwissen effektiv interagieren kann.“

Wesentlicher Aspekt dieser Definition ist die aus den Merkmalen der Intuition abgeleitete, unbewusste Anwendung von Vorwissen. Benutzer interagieren, indem sie bereits vorliegende Informationen nutzen. Dies kann etwa die Nutzung bekannter Muster oder Eingabetechnologie sein. Da intuitiv benutzbare technische Systeme dementsprechend von einem großen Benutzerkreis bedient werden können, besteht eine Ähnlichkeit zu dem Begriff der Zugänglichkeit. Diese ist definiert als

„Gebrauchstauglichkeit eines Produktes, einer Dienstleistung, einer Umgebung oder einer Einrichtung für eine in Bezug auf ihre Fähigkeiten möglichst weit gefasste Gruppe von Menschen“. [DIN EN ISO 9241-171, S. 8]

Weiterhin wird unter Gebrauchstauglichkeit das

„Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden können, um festgelegte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ [DIN EN ISO 9241-210, S. 7],

verstanden. Intuitivität erweitert damit den Begriff der Zugänglichkeit um den Aspekt der unbewussten Anwendung von Vorwissen. Diese Eigenschaft drückt sich beispielsweise darin aus, dass ein intuitiv bedienbares System ohne vorherige Schulung benutzt werden kann. Zugänglichkeit hingegen bezieht sich ausschließlich auf die generelle Eignung der Benutzung durch eine möglichst große Gruppe von Menschen, trifft jedoch keine Aussage etwa über die Einarbeitungszeit.

Intuitivität wird auf unterschiedlichste technische Systeme bezogen. Diese sind unter anderem die Armaturen eines PKW [Köth 2011], insbesondere in Verbindung mit Touch-Techniken [Kouba und Dickson 2015], Chatbots für die industrielle

Anwendung [Cirullies und Pikus 2017], die Steuerung bzw. Programmierung einer Roboterzelle [Tuhkanen 2011; Müller et al. 2017] aber auch Montageassistenzsysteme [Müller et al. 2018].

2.4.2 Definition intuitive Planung

Zur Schaffung eines einheitlichen Verständnisses werden die vorherigen Ausführungen in einer Definition zusammengefasst. Der Fokus liegt dabei auf dem technischen Verständnis der Intuitivität, welches um die Merkmale der Intuition erweitert wird. Intuitive Planung wird in dieser Arbeit wie folgt definiert:

Ein Planungssystem ist intuitiv, wenn es durch den Anwender eingesetzt werden kann, indem Vorwissen unbewusst genutzt wird. Dies bezieht sich sowohl auf die Technologie (beispielsweise der Eingabeform) als auch auf die Art und Weise der Nutzung und Benutzerführung. Zudem ist die Eignung zur spontanen Benutzung, also ohne langwierige Vor- und Nachbereitung der Planung, eine wesentliche Anforderung.

Der Definition entsprechend ist bei der intuitiven Planung Vorwissen bezüglich der Methoden- oder Werkzeugkompetenz nur zu einem möglichst geringen Teil Voraussetzung. Der Fokus liegt insbesondere auf der Entfaltung der individuellen Kompetenzen des Anwenders. Durch diese Eigenschaften ist die intuitive Planung besonders geeignet für Fälle, in denen Entscheidungsträger integriert werden sollen; sie kann jedoch auch bei der Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachbereiche unterstützen. Ziel der intuitiven Planung ist es, die Integration von Entscheidungsträgern in den direkten Planungsprozess zu verbessern, indem Komplexitätshürden hinsichtlich der Methode oder des Werkzeugs möglichst ausgeräumt werden.

In der Digitalen Fabrik ist die Komplexitätsreduzierung eingesetzter Werkzeuge schon früh als Handlungsfeld erkannt worden [Bley et al. 2006, S. 20-21], jedoch bisher nur unzureichend umgesetzt [Petzelt et al. 2010, S. 135]. Erste Ansätze bieten beispielsweise intuitive Apps zur Kollaboration in logistischen Lieferketten [Bracht und Hinrichs-Stark 2015, S. 853]. Intuitivität wird jedoch gerade bei der

Layoutplanung und dem damit verbundenen CAD-Zeichnen schon länger gefordert [Bracht und Fahlbusch 2001, S. 21].

Schnittmengen bestehen zu den Begriffen der smarten Fabrikplanung [Sontag 2014, S. 5-6] und der smarten digitalen Layoutplanung [Brosch 2014, S. 69]. Diese haben zwar auch die intuitive Bedienung als Teilziel, fokussieren sich aber auf die digitale Datenaufnahme bei Umplanungen auf Bereichs- und Maschinenebene [Bracht und Sontag 2013] bzw. die Mobilität der Anwendung bei Umplanungen vor Ort [Bracht et al. 2010; Bracht et al. 2013a]. Die Einbindung von hierarchisch und fachlich unterschiedlichen Planern bei der Fabriklayoutplanung wird in diesen Konzepten nicht angestrebt.

Eine Spezifizierung des Begriffes der intuitiven Planung zur intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung erfolgt in Kapitel 3.1.

2.4.3 Partizipative Planung

Die Einbeziehung verschiedener Wissensträger in den Planungsprozess wird als partizipative Planung bezeichnet (lat. participatio, Beteiligung). Die Wissensträger können dabei Mitarbeiter aus anderen Fachbereichen oder auch Partnerfirmen des planenden Unternehmens sein. Es kann somit zwischen interner und externer Partizipation unterschieden werden [Wiendahl et al. 2000, S. 8-9].

Durch die Partizipation wird versucht, das an den Wissensträger gebundene Wissen für den Planungsprozess nutzbar zu machen. Zu unterscheiden sind hierbei die beiden Wissenstypen des expliziten und des impliziten Wissens.

Explizites Wissen lässt sich in formaler, systematischer Sprache wiedergeben und auch durch technische Systeme speichern. Es kann dadurch direkt in den Planungsprozess eingebracht werden. Da explizites Wissen auch durch Informationstechnik gespeichert, verarbeitet und auch weitergegeben werden kann, ist dieses Wissen weit verbreitet. Implizites Wissen hingegen beruht auf Erfahrungen und ist nur schwer kommunizierbar [Nonaka und Takeuchi 2012, S. 76-77]. Es bietet meistens einen großen Wissensvorsprung, da es oft in seiner spezifischen Form, Verknüpfung und Qualität einzigartig und nicht frei verfügbar ist.

Um implizites Wissen in den Planungsprozess einfließen zu lassen, muss es umgewandelt werden. Dies geschieht nach der Wissensspirale von *Nonaka und Takeuchi* innerhalb eines dazu geeigneten Interaktionsfeldes [Nonaka und Takeuchi 2012, S. 89-90]. Werden dazu Planungsmethoden oder -werkzeuge eingesetzt, ist es wichtig, dass diese intuitiv anzuwenden sind, um keine Komplexitätshürden entstehen zu lassen, die die Partizipation hemmen würden.

Werden unterschiedliche Fachkompetenzen frühzeitig in partizipativen Planungsteams zusammengeführt, ist eine zeitlich eng gestaffelte Erarbeitung von Inhalten möglich [Grundig 2018, S. 28]. Der direkte Austausch ermöglicht hier frühzeitige, schnelle Abstimmungen und ein effizienteres Arbeiten sowie eine ganzheitliche Sichtweise. Mangelnde Integration aller Teildisziplinen in den Planungsprozess kann hingegen Probleme hinsichtlich Zeit, Kosten oder Qualität entstehen lassen [Hirsch et al. 2013, S. 850]. Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der unterschiedlichen Fachkompetenzen ist also im Sinne eines reibungslosen Planungsprozesses und eines ganzheitlichen Planungsergebnisses anzustreben.

Die Partizipation kann nach verschiedenen Merkmalen, wie Partizipationssubjekt oder Partizipationsobjekt, klassifiziert werden. Zumeist wird unter dem Begriff der Partizipation die Mitarbeiterpartizipation, also die Einbeziehung der Arbeitskräfte eines Unternehmens, verstanden [Schmicker et al. 1994, S. 7-8]. Ziel ist es hier, „Betroffene zu Beteiligten“ zu machen und somit von dem umfangreichen impliziten Wissen des Werkers hinsichtlich seines Arbeitsplatzes zu profitieren und die Akzeptanz des Planungsergebnisses beim späteren Nutzer zu erhöhen. Aus verschiedenen Gründen, wie beispielsweise unternehmenspolitischen Überlegungen, wird die Mitarbeiterpartizipation meistens nicht pauschal, sondern nur selektiv eingesetzt.

Mitarbeiterpartizipation ist generell mit fortschreitender Detaillierung der Planung sinnvoll [Dombrowski et al. 2017, S. 766]. Zudem sinkt das Potential mit steigender Planungsebene bzw. dem Übergang von der operativen zur strategischen Ebene stetig ab [Wiendahl et al. 2000, S. 5; Menzel 2000, S. 51-52; Palluck 2011, S. 142-143]. Die sinnvolle Partizipation von Entscheidern und operativen Mitarbeitern lässt sich daher nach Planungsfortschritt und –ebene einteilen (**Abbildung 2-16**).

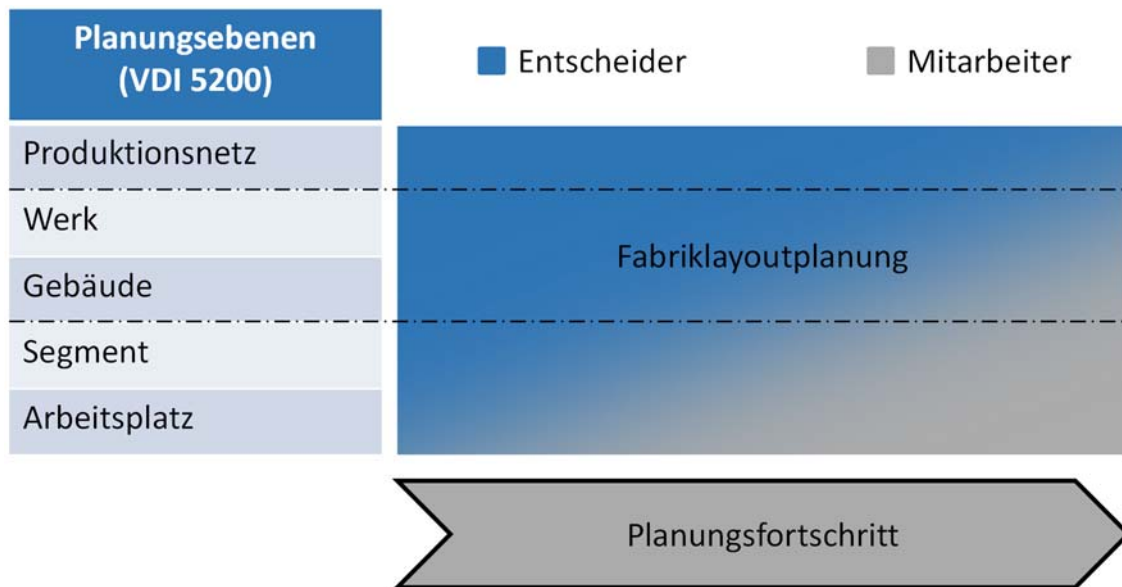


Abbildung 2-16: Partizipation von Entscheidern und operativen Mitarbeitern nach Planungsfortschritt und -ebene

In höheren Planungsebenen und früheren Planungsphasen ist die Partizipation von Wissensträgern gefragt, die über entsprechendes implizites Wissen bezüglich anstehender Grundsatzentscheidungen verfügen. Wie zu erkennen ist, wird in der Fabriklayoutplanung in frühen Phasen vor allem die Partizipation von Entscheidungsträgern benötigt, während operative Mitarbeiter erst sehr spät im Prozess bei entsprechenden Detailentscheidungen beteiligt werden können.

Wirken Entscheidungsträger bei der Partizipation gemeinsam mit Fachplanern an der Fabriklayoutplanung mit, so bedeutet dies eine gemeinsame Arbeit unterschiedlicher Hierarchieebenen. Die dabei auftretenden hierarchischen Strukturen können zu zwei wesentlichen Mängeln führen: Zum einen kann die Unfähigkeit, sich an komplexe, vieldeutige und schnell verändernde Verhältnisse anzupassen, eine Folge sein. Zum anderen können diese Strukturen ein Klima schaffen, in dem Innovationen nur schwerlich entwickelt und umgesetzt werden können [Wahren 1994, S. 79]. Die Ursachen dafür können verschiedener Natur sein. Zumeist ist es das Festhalten an bekannten Strukturen, um der Unternehmenspolitik oder der durch hierarchische Strukturen vorgelebten Normenordnung zu entsprechen. Hierarchische Effekte können bei der gemeinsamen Arbeit dementsprechend nicht ausgeschlossen werden. An dieser Stelle bietet die intuitive Planung eine Möglichkeit, gemeinsam kreativ zu arbeiten, indem Entscheider in dem unmittelbaren Planungsprozess involviert werden und somit auf Augenhöhe

agieren. In diesem Rahmen können sie dadurch neben ihrer Entscheidungskompetenz auch ihr implizites Wissen in die Planung einbringen.

Wird die Umwandlung von implizitem in explizites Wissen während der Partizipation durch entsprechende Methoden und Werkzeuge unterstützt, sind zwei Effekte möglich: Die Planungsqualität kann gesteigert und die Planungszeit verkürzt werden [vgl. Dombrowski und Hennersdorf 2010, S. 235], wodurch erfolgreiche Partizipation gemessen werden kann (vgl. Kapitel 5). Aufgrund der eingangs beschriebenen Umbrüche in der Automobilindustrie wird deutlich, dass eine stärkere Einbindung von Entscheidungsträgern in die frühen Planungsphasen und auf hohen Planungsebenen einen entscheidenden Vorteil bietet.

Entscheidungsträger würden dadurch frühzeitig in die Planung einbezogen werden können. Ihr spezifisches Wissen und ihre holistische Sichtweise erweitert den Suchraum zur Lösungsfindung und erhöht somit die Qualität der ausgeplanten Varianten und auch den vorgedachten, jedoch nicht vordefinierten Handlungsspielraum (vgl. Kapitel 2.2.1, Szenario-Management). Fehlende Partizipation der für die Planungsaufgabe wesentlichen Entscheidungsträger führt damit im Ergebnis tendenziell zu eher wandlungsträgen Fabriken.

Die Chance, die der frühzeitige Einsatz partizipativer Planung – auch für Fabrikstrukturen – bietet, wurde schon früh erkannt. Der intuitive Umgang mit der Planung ohne Kenntnis der Werkzeuge ist dabei wesentliche Voraussetzung [Bracht und Fahlbusch 2001, S. 26]. Die Unterstützung frühzeitiger Partizipation entsprechender Entscheidungsträger durch die intuitive Planung muss damit eine wesentliche Anforderung an ein Layoutwerkzeug sein.

2.5 Analyse der Methoden und Werkzeuge der Layoutplanung

Zur Planung von Layouts werden verschiedene Methoden und Werkzeuge eingesetzt, welche in diesem Kapitel dargestellt und analysiert werden. Dazu wird zunächst ein Überblick der Methoden und Werkzeuge gegeben. Danach werden die vorgestellten Konzepte den zuvor in den Kapiteln 0 bis 2.4 erarbeiteten Grundlagen gegenübergestellt und verglichen.

Da der Fokus dieser Arbeit auf der frühen Phase der Fabriklayoutplanung liegt, werden in diesem Kapitel Anordnungsmethoden wie Dreiecks- oder Kreismethode oder mathematische Methoden, wie sie zur Planung von Produktionslayouts eingesetzt werden, nicht betrachtet (vgl. Kapitel 2.2.4).

2.5.1 Stand der Technik

Die Layoutplanung wird von den Anwendern der Digitalen Fabrik als eine der wichtigsten Funktionen angesehen [Schallow et al. 2014, S. 142]. Dementsprechend existieren zur digitalen Planung von Fabriklayouts eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden und Werkzeugen. Diese lassen sich in folgende Klassen einteilen:

- Analoge Methoden und Werkzeuge
- Digitale Methoden und Werkzeuge
 - Office-Software
 - Spezialisierte Fabrikplanungssysteme
 - Hard-/Software-Kombinationen
- Hybride Methoden und Werkzeuge

Im Folgenden werden zu jeder dieser Klassen relevante Methoden und Werkzeuge vorgestellt.

2.5.1.1 Analoge Methoden und Werkzeuge

Neben Skizzen auf Papier ist das Schiebelayout die klassische Methode der Layoutplanung. Lange Zeit wurde es als das wichtigste Planungsmittel angesehen [Dolezalek 1973, S. 303]. Das Schiebelayout ist ein in der Durchführung sehr einfaches Verfahren. Die zu platzierenden Objekte werden als Schablonen, z.B. aus Karton oder Styropor, ausgeschnitten und können auf einem vorgefertigten Grundplan einfach platziert, verschoben und umgruppiert werden [Dombrowski et al. 2003, S. 34].

Durch die sehr intuitive Handhabung wird die analoge Methode immer noch häufig eingesetzt, wenn viele unterschiedliche Beteiligte in Workshops zusammenarbeiten. Dem gegenüber steht die langwierige und aufwendige Vor- und

Nachbereitung, fehlende Dokumentation und schlechte Unterstützung der Variantenplanung im Sinne des Szenario-Managements (vgl. Kapitel 2.2.1). Die Ergebnisse müssen im Nachgang digitalisiert werden. Bei dem Nachzeichnen im CAD-Programm entstehen redundante Daten und ggf. Inkonsistenzen. Zudem können Übertragungsfehler auftreten.

2.5.1.2 Digitale Methoden und Werkzeuge

Die digitalen Methoden und Werkzeuge lassen sich in drei Unterklassen einteilen: Office-Programme, spezialisierte Fabrikplanungssysteme und Hard-/Softwarekombinationen.

Zu den **Office-Programmen**, welche zur Layoutplanung zweckentfremdet werden, gehören PowerPoint und Visio und freie Pendanten. Diese werden teilweise durch Add-ins angepasst [\"FP-PPT\": WZL 2018] oder sind Grundlage eines darauf basierenden Systems [Gärtner 2018; Plavis 2018]. Diese Programme werden genutzt, da sie vermeintlich einfacher einzusetzen sind [Petzelt et al. 2010, S. 134]. Der Aspekt der digitalen Durchgängigkeit findet bei diesen Anwendungen jedoch keine Berücksichtigung.

Der große Nachteil an diesen Lösungen ist die fehlende oder eingeschränkte Kompatibilität mit CAD-Daten. Um bestehende Daten in der Layoutplanung nutzen oder um Planungsergebnisse weiterverwenden zu können, ist ein Systembruch unumgänglich. Dies führt zu den bereits beschriebenen Informationsverlusten, Redundanzen und Inkonsistenzen im Datenbestand (vgl. Kapitel 2.3.2).

Spezialisierte Fabrikplanungssysteme werden vor allem in der Automobilindustrie eingesetzt. Diese führen viele Anwendungen mit einer gemeinsamen Datenhaltung innerhalb eines Hauptsystems zusammen. Der grundsätzliche Aufbau besteht dabei aus einer Datenbank, einer Planverwaltung und einem 3D-CAD-System sowie verschiedenen herstellerspezifischen Applikationen [König 2013, S. 47-48; Bracht et al. 2015, S. 639]. Diese Grundstruktur ist bei den OEM Audi, BMW, Daimler und VW gleich. Als Kernsystem kommt dabei Software der Firma Bentley Systems zum Einsatz, lediglich Opel verwendet AutoCAD

[VDA 2009, S. 7-8]. Aufgrund des großen Systemumfangs und besonderen Spezifika wählen manche Hersteller Eigennamen für ihre Systeme (VW: HLS; Daimler: FAPLIS).

Der große Vorteil dieser Fabrikplanungssysteme ist die digitale Durchgängigkeit aufgrund der gemeinsamen Datenbasis (vgl. Kapitel 2.3.2) und somit die Sicherstellung einer durchgängig CAD-gestützten Planungskette [Faber und Bracht 1988, S. 320]. Erzeugte Planungsergebnisse stehen umgehend weiteren Beteiligten sowie für Folgeaufgaben und -projekten zur Verfügung. Eine nahtlose Weiternutzung ist damit möglich. Ein ausgereiftes Datenmanagement mit Unterstützung der Variantenplanung und Versionierung verhindert Redundanzen und Inkonsistenzen im Datenbestand. Die Automobilindustrie nimmt – neben der Luft- und Raumfahrtindustrie – unter anderem deswegen eine Vorreiterrolle bei der Umsetzung der Digitalen Fabrik ein [Bracht et al. 2018, S. 16].

Aufgrund des Funktionsumfangs und der komplexen Bedienung gelten Fabrikplanungssysteme als Expertensysteme und erfordern umfangreiches Wissen bei der Anwendung [Schuh et al. 2002, S. 48; Kerber 2016, S. 82]. Dies spiegelt sich auch darin wider, dass Zugriffsberechtigungen fachabteilungs- und personenbezogen sind. Diese Rechte werden erst nach mehrtägigen Kursen erteilt. Damit stehen aktuelle Fabrikplanungssysteme in Widerspruch zu der Definition einer intuitiven Planung, insbesondere der spontanen Benutzbarkeit und der unbewussten Nutzung von Vorwissen (vgl. Kapitel 2.4.2).

Die dritte Unterklasse sind **Hard-/Software-Kombinationen**. Durch die Kombination von der Methode des Schiebelayouts und der digitalen Layoutplanung wurde das Konzept des Planungstisches ["BUILD-IT": Rauterberg et al. 1997; Fjeld et al. 1999] entwickelt (**Abbildung 2-17**).

Der BUILD-IT-Tisch basiert auf der Projektion eines 2D-Layouts auf eine Tischplatte und einer 3D-Darstellung auf einer Leinwand. Die Manipulation des Layouts erfolgt durch „Bricks“, welche von einer Infrarotkamera erfasst werden. Auch in anderen Planungsbereichen wurden früh Untersuchungen mit ähnlichen Systemen durchgeführt ["Urp": Underkoffler und Ishii 1999].



Abbildung 2-17: BUILD-IT Planungstisch [Quelle: IMAB]

Vorteile sind die intuitive Bedienung [Bracht et al. 2018, S. 163] und die Unterstützung bei der Artikulation impliziten Wissens, wodurch das im Unternehmen vorhandene Know-how bestmöglich genutzt werden kann. Aufgrund verschiedener technischer Unzulänglichkeiten konnten sich die ersten Umsetzungen nicht etablieren. Entscheidend nachteilig war dabei die isolierte Stellung im Gesamtsystem, welches auf Schnittstellen zur Umgebung angewiesen ist. Durch die unzureichende Datenkompatibilität hat es als Inselsystem keine große Verbreitung gefunden.

Weiterentwicklungen des ursprünglichen Konzeptes konzentrieren sich auf die Verbesserung der Bedienung und damit der Partizipation ["i-plant": Westkämper et al. 2004], der Einführung von der Multi-Touch-Technologie ["visTable": Müller et al. 2003], die Fokussierung auf Mitarbeiter direkter Produktionsbereiche ["T3PAD": Dombrowski und Riechel 2010], einer Weiterentwicklung der GUI und der Einbindung eines Stifts in die Software visTable [Precht et al. 2010] oder auf den Abgleich von Planungsrestriktionen auf Anlagenebene [Gäse et al. 2005; "IFU Planungstisch 4.0": Dombrowski 2016].

Ebenfalls wird versucht, die Interaktion mit dem System durch 3D-Objekte zu verbessern und somit einen Teil des Bedienungskonzepts des BUILD-IT wieder

aufzugreifen ["DEPlaTa": Herbig 2015; Dombrowski 2016]. Diese sogenannten Tangibles werden in der Planung auf Displays schon länger erforscht [Hornecker und Buur 2006], haben sich aber bisher nicht durchgesetzt. Unter anderem kann bei ihrem Einsatz der Bildausschnitt nicht verschoben oder vergrößert/verkleinert werden. Zudem ist die Vorbereitung der Modelle sehr aufwendig, da sie zumeist Einzelanfertigungen für jeden Planungsfall sind. Der Einsatz von Tangibles ist somit sehr unflexibel. Stand der Technik ist die Bedienung des Systems über Multi-Touch-Displays, zu diesen sind auch andere Fachbereiche übergegangen [Ebner et al. 2012].

Neben der vielseitigen Multi-Touch-Technologie kommen auch andere Methoden für die Interaktion mit einem Planungssystem in Frage. Dies kann beispielsweise Augmented Reality (AR) ["VOMAR": Billingham et al. 2008, 2018] oder auch die Verbindung von Touch-Technologie und NFC-Tags ["Project Zanzibar": Villar et al. 2018] sein. In beiden Fällen müssen die Objekte jedoch auch entsprechend vorbereitet werden, welches einem schnellen, spontanen und kreativen Planen gegenübersteht.

Die verschiedenen Versionen und Weiterentwicklungen des Planungstisches existieren als eigenständige Systeme und sind über Schnittstellen bzw. Dateikonverter an weitere Software angebunden. Ferner basieren einzelne Lösungen auf der Office-Software Visio und haben nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten im Umgang mit CAD-Daten. Sie behindern dadurch die digitale Durchgängigkeit und somit den Einsatz dieses Werkzeugs. Die Auflösung von Schnittstellen und die Integration in größere Fabrikplanungssysteme wurden in den Weiterentwicklungen des ursprünglichen BUILD-IT bisher nicht angestrebt. Der Nutzen des generellen Konzepts des Planungstisches hinsichtlich der Partizipation wird jedoch fortlaufend in Untersuchungen bestätigt [u.a. Schuh et al. 2002; Kampker et al. 2012; Aurich und Jäger 2014].

2.5.1.3 Hybride Methoden und Werkzeuge

Durch Kombination von analogen und digitalen Elementen werden hybride Methoden und Werkzeuge gebildet. Dazu zählen unter anderem

3P-Planungsworkshops (Produktions-Planungs-Prozess) in der Automobilindustrie (Abbildung 2-18).



Abbildung 2-18: 3P-Workshop [VW AG 2007]

Diese Planungsmethode basiert auf Papier und Karton [VW AG 2007], wird jedoch um Elemente der Augmented Reality (AR) erweitert, um eine bessere Visualisierung zu ermöglichen [Bracht et al. 2018, S. 155-156]. Weitere Kombinationen analoger und digitaler Elemente stellen die hybride Fabrikplanung [Ackermann und Börner 2016; Ackermann et al. 2017] und das Projekt „IntuPlan“ dar [Rohling 2012].

Beide Ansätze verbinden reale und virtuelle Fabrikmodelle und versuchen die Vorteile beider Welten für sich zu nutzen. Jedoch ist während der Planung der Abgleich realer und virtueller Modelle eine ständige Aufgabe, die durch Iterationen im Planungsprozess zu einem großen Nachteil wird: Ähnlich der Digitalisierung bei analogen Methoden, ist die Synchronisation aufwendig und Fehler bei der Übertragung können nicht ausgeschlossen werden. Die Anpassung der physischen Fabrikmodelle kann zudem nicht direkt erfolgen, sondern muss beispielsweise erst am Rechner modelliert und dann durch additive Fertigungsverfahren nachgebildet werden.

2.5.2 Vor- und Nachteile bisheriger Systeme

Die Layoutplanung ist eine hochgradig kollaborative Aufgabe, welche es erfordert, verschiedene Anforderungen und Sichtweisen abzustimmen, technische und regulatorische Regelungen einzuhalten sowie Abhängigkeiten und Anforderungen zu berücksichtigen [Shariatzadeh et al. 2012, S. 299]. Verschiedene Planungsbeteiligte haben unterschiedliche Sichtweisen auf die Layoutplanung [Bischoff 2011, S. 74-75], typischerweise sind darüber hinaus mehrere Firmen an der digitalen Planung von Layouts beteiligt [Bracht et al. 2018, S. 268-270]. Dadurch existieren diverse Anforderungen an die Layoutplanung, welche sich in der Spezialisierung der Werkzeuge niederschlagen.

Mit dieser Spezialisierung geht häufig eine mangelhafte Anbindung an die Systemumwelt einher [Schuh et al. 2011, S. 92; Kampker et al. 2014, S. 193]. Dies erklärt, wieso Software für die Fabrikplanung überwiegend als Insellösung konzipiert ist [Pawellek 2014, S. 426]. Die Automobilindustrie bildet dabei mit den Fabrikplanungssystemen eine Ausnahme. **Abbildung 2-19** zeigt einige der zum Einsatz kommenden digitalen Werkzeuge und Methoden in Abhängigkeit der Detaillierung der Planung und den Planungsphasen nach der VDI 5200 Blatt 1.

Zu erkennen ist mit fortschreitender Planung und Detaillierung eine ansteigende Spezialisierung der Software. Ab der Phase der Detailplanung existiert eine ausgeprägte digitale Unterstützung für verschiedenste Planungstätigkeiten. Des Weiteren ist es ab diesem Punkt möglich, die erzeugten digitalen Modelle in andere Systeme zu übernehmen und weiterzuverwenden. Vorgelagert fehlt im Planungsprozess eine digitale Integration der eingesetzten Methoden und Werkzeuge, womit es hier unweigerlich zu einem Bruch in der digitalen Durchgängigkeit kommt, wie sie eigentlich für den wirkungsvollen Einsatz der Digitalen Fabrik notwendig ist (vgl. Kapitel 2.3.2).

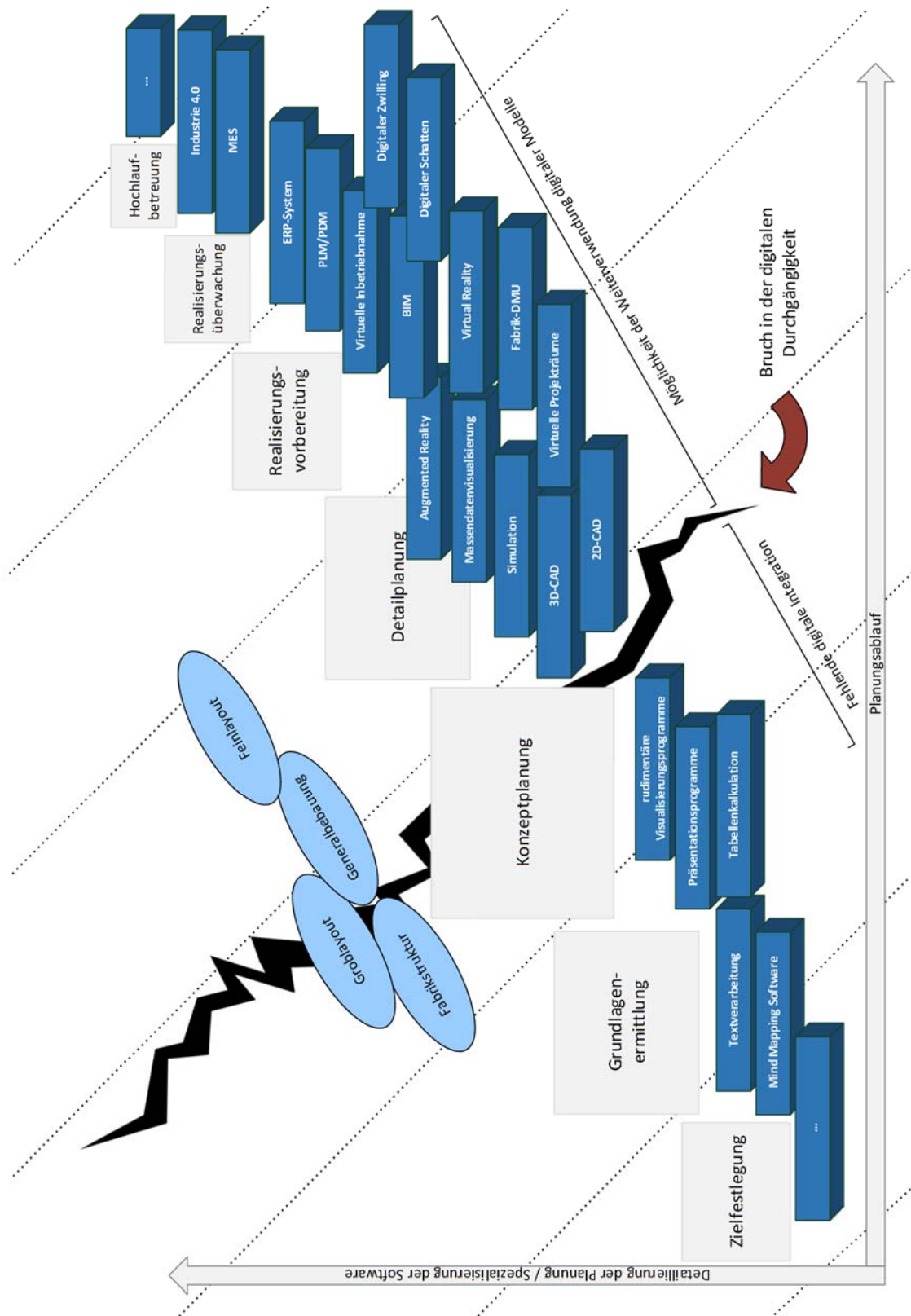


Abbildung 2-19: Einsatz von digitalen Werkzeugen und Methoden für die Fabrikplanung [Schäfer und Bracht 2018, S. 612]

Dieser Bruch betrifft vor allem die verschiedenen digitalen Werkzeuge und Methoden zur Layoutplanung, da er genau den Übergang von der Groblayout- zur Generalbebauungsplanung betrifft. Oftmals kommt es im Planungsprozess zu einem kombinierten Einsatz mehrerer Planungswerkzeuge und -methoden: Beispielsweise wird die Grobplanung mit einem Schiebelayout auf Papierbasis durchgeführt und die Ergebnisse werden anschließend aufwendig digitalisiert, indem sie nachgezeichnet werden. Die Feinplanung erfolgt danach in CAD-Systemen. Statt der Layoutplanung auf Papier kann auch eine der vorgestellten Hard-/Softwarekombinationen für die Grobplanung eingesetzt werden. Ein großes Problem dieser Vorgehensweise sind die häufigen Systembrüche durch die Digitalisierung oder Konvertierung, die aufgrund der iterativen Vorgehensweise der Planung und des intensiven Abstimmungsbedarfs, insbesondere bei der Parallelisierung, auftreten (vgl. Kapitel 2.2.2).

Ein ähnliches Problem existiert bei dem Einsatz hybrider Methoden und Werkzeuge, wie etwa IntuPlan. Durch den parallelen Einsatz von physischen und digitalen Fabrikmodellen entsteht aufgrund der notwendigen Synchronisation der Modelle ein hoher Zeitaufwand und die Gefahr von Informationsverlusten.

Der Planungstisch eignet sich prinzipiell für die Layoutgestaltung in der frühen Phase sehr gut [Schuh et al. 2002, S. 51]. Dies ist dadurch zu begründen, dass in dieser Phase eine starke Partizipation gefragt ist, jedoch viele Feinheiten noch nicht ausgeplant werden müssen. Nach der Übertragung in andere Systeme wird die Detaillierung von den jeweiligen Fachplanern nach dem zuvor gemeinsam erarbeiteten Konzept vorgenommen.

Aufgrund des Datenbruchs wird selbst von überzeugten Anwendern die Empfehlung ausgesprochen, den Planungstisch nur zur Unterstützung bei einzelnen Workshops, anstatt als generelles Planungsinstrument zu verwenden, damit die Daten lediglich kurzfristig abglichen werden müssen [Schuh et al. 2002, S. 51].

Generell muss der Einsatz der Digitalen Fabrik in den frühen Planungsphasen noch verbessert werden, um durch entsprechendes Frontloading einen weitergehenden Einsatz in späteren Planungsphasen besser zu ermöglichen und

vorzubereiten [Spillner 2012, S. 65]. Die Komplexität der digitalen Planungssysteme stellt zudem eine Hürde bei der aktiven Einbindung aller Beteiligten dar, weshalb ein intuitives Planungswerkzeug benötigt wird [Schlegel et al. 2014, S. 36]. Dies betrifft insbesondere Entscheidungsträger, die sich ohne ein entsprechendes Werkzeug nicht am direkten Planungsprozess beteiligen können.

2.6 Zusammenfassung des Untersuchungsbedarfs

In diesem Abschnitt werden die in den Kapiteln 2.2 bis 2.4 erarbeiteten Anforderungen mit dem in Kapitel 2.5.1 dargestellten Stand der Technik der Layoutplanung gegenübergestellt und der Untersuchungsbedarf zusammengefasst.

Abbildung 2-20 stellt das Spannungsfeld der eingangs beschriebenen Herausforderungen zwischen Produktion und Planung sowie die Ableitung der wesentlichen Eigenschaften einer intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung dar.

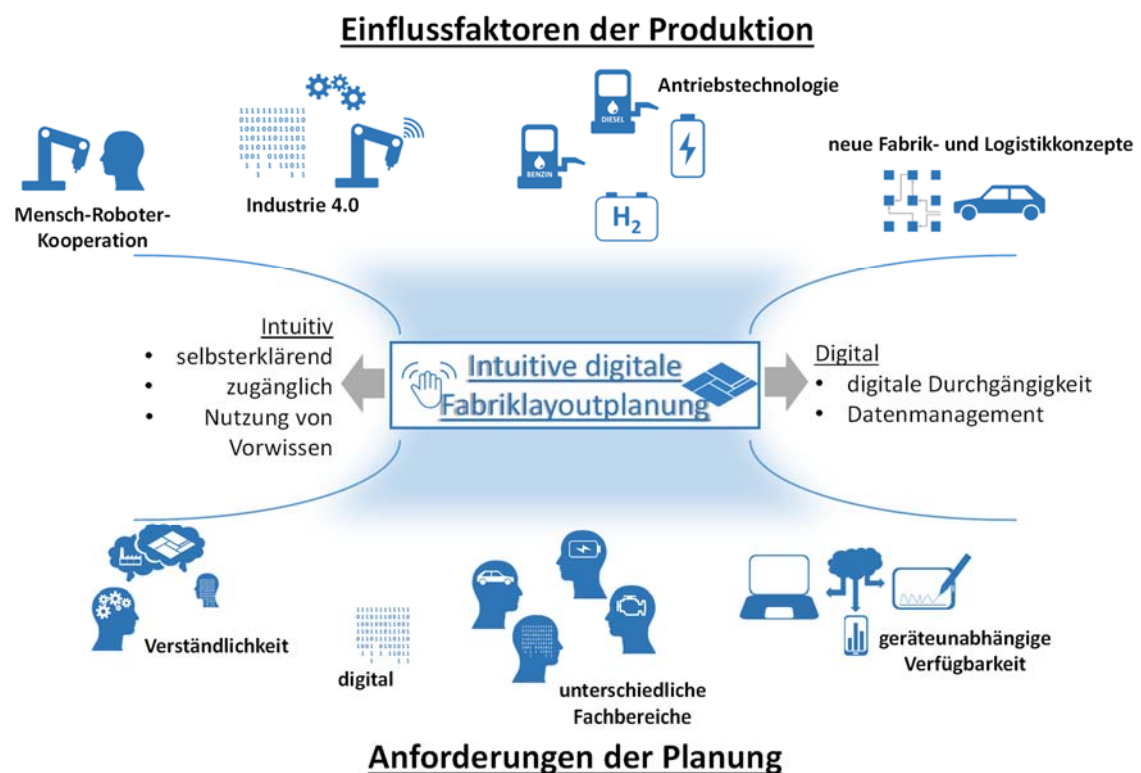


Abbildung 2-20: Intuitive digitale Fabriklayoutplanung als Antwort auf die disruptiven Umbrüche in der Automobilindustrie [in Anlehnung an Schäfer und Bracht 2018, S. 613]

Die intuitive digitale Fabriklayoutplanung muss sowohl die Einflussfaktoren der Produktion als auch die Anforderungen der Planung berücksichtigen. Es können

demnach zwei Eigenschaften für ein Layoutwerkzeug identifiziert werden: Einerseits muss digitale Durchgängigkeit im Sinne der Digitalen Fabrik gegeben sein, damit die häufigen iterativen Abstimmungsprozesse in parallelisierten Planungsphasen der Grob- und Feinlayoutplanung ermöglicht werden (Kapitel 2.3). Andererseits muss ein Layoutwerkzeug eine hohe Intuitivität ausweisen, damit ein möglichst großer Kreis von fachlich und hierarchisch unterschiedlichen Planern, jedoch insbesondere Entscheidungsträger der Layoutentwicklung, in frühen Phasen unmittelbar im Planungsprozess partizipieren können (Kapitel 2.4).

Diese beiden Anforderungen sollen im Folgenden anhand der in Kapitel 2.5.1 und 2.5.2 analysierten Methoden und Werkzeuge zur Ableitung des Untersuchungsbedarfs dienen. **Abbildung 2-21** stellt die beiden Anforderungen als Portfolioanalyse dar und ordnet die in Kapitel 2.5.1 betrachteten Klassen von Methoden und Werkzeugen nach Erfüllungsgrad ein.

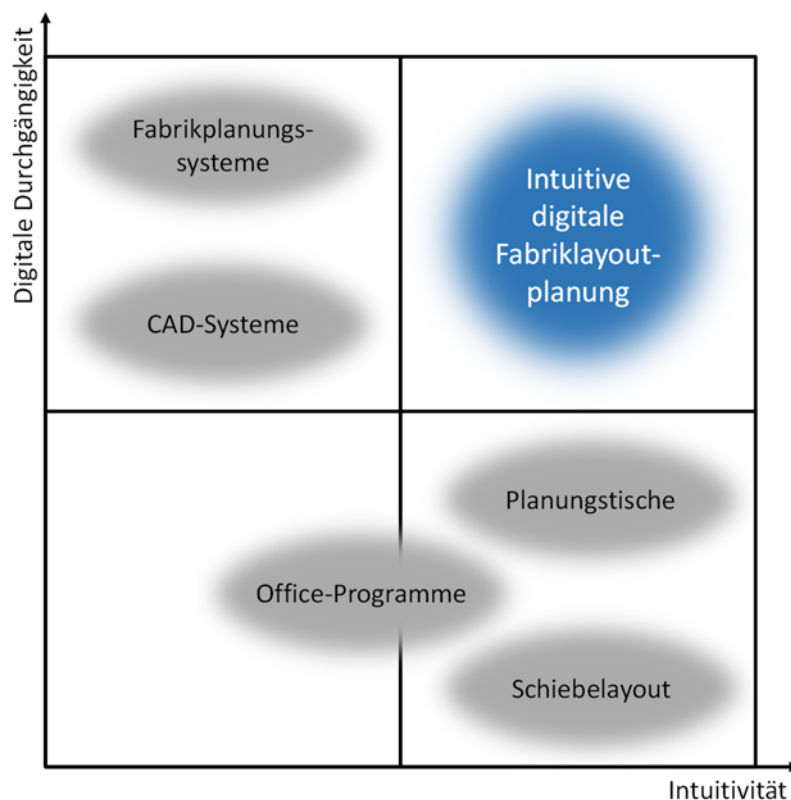


Abbildung 2-21: Portfolioanalyse betrachteter Klassen von Methoden und Werkzeugen bezüglich der Erfüllungsgrade der Intuitivität und digitaler Durchgängigkeit für die Layoutplanung in der frühen Phase

Zum einen existieren intuitive Planungslösungen, welche, wie zuvor definiert (vgl. Kapitel 2.4.2), eine einfache Benutzbarkeit ohne Einarbeitungszeit ermöglichen. Diese bieten jedoch kein durchgängiges Datenmanagement und tragen damit zum Bruch der digitalen Durchgängigkeit bei.

Zum anderen werden verschiedene Methoden und Werkzeuge eingesetzt, welche über ein ausgeprägtes Datenmanagement verfügen und völlig in die Systemumwelt und Planungsabläufe integriert sind. Diese sind allerdings ausgewiesene Expertensysteme und benötigen vor der Benutzung aufwendige Schulungen, wodurch sie nicht für die in die Fabriklayoutplanung einzubindenden Entscheidungsträger nutzbar sind.

Die gleichzeitige Erfüllung beider Anforderungen erreicht derzeit kein System. Dies unterstreicht die in der Problemstellung (Kapitel 1.2) beschriebene Notwendigkeit eines neuen Layoutwerkzeugs zur Fabrikplanung in der frühen Phase. Den bestehenden Widerspruch zwischen intuitiver Planung und digitaler Durchgängigkeit gilt es aufzulösen und ein Werkzeug zur Verfügung zu stellen, welches beide Anforderungen erfüllt. Dieses Zielfeld ist im Portfolio mit „Intuitiver digitaler Fabriklayoutplanung“ gekennzeichnet und soll das Defizit der derzeit existierenden Methoden und Werkzeuge der Layoutplanung beheben.

3 Konzeptentwicklung eines intuitiven digitalen Planungswerkzeugs

Aufbauend auf dem zuvor identifizierten Forschungsbedarf wird in diesem Kapitel das Konzept eines Werkzeugs zur intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung entwickelt.

Dazu werden die Ergebnisse der bisherigen Ausführungen zur Fabriklayoutplanung, zur Digitalen Fabrik und zur intuitiven Planung in einer Definition der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung zusammengeführt (Kapitel 3.1). Der Konzeption folgt eine Beschreibung des Einsatzgebietes und der Zielfelder der Fabriklayoutplanung (Kapitel 3.2). Diese dient zur Ableitung von Anforderungen an das Werkzeug (Kapitel 3.3).

3.1 Intuitive digitale Fabriklayoutplanung

Die Definition der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung ergibt sich anhand der bisherigen Ausführungen und leitet sich aus der Zielsetzung, dem Betrachtungsraum und dem identifizierten Forschungsbedarf ab (**Abbildung 3-1**).

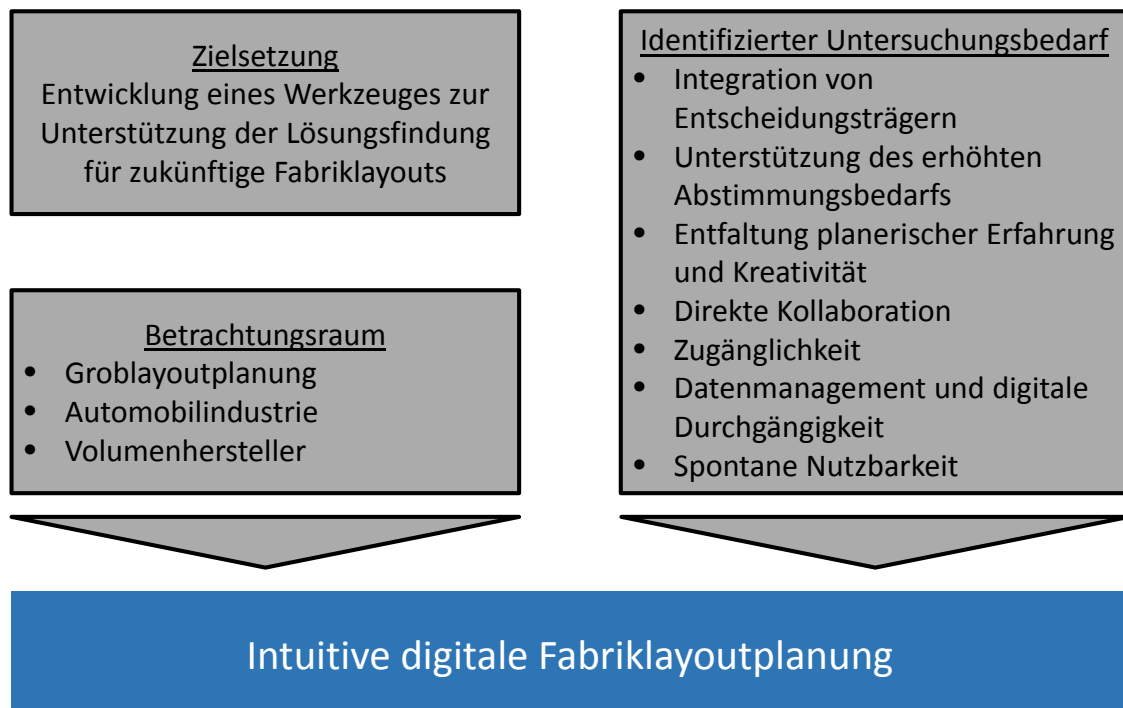


Abbildung 3-1: Herleitung der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung

Ausgehend von der Zielsetzung, ein Werkzeug zur Unterstützung der Lösungsfindung für zukünftige Fabriklayouts zu gestalten, wurde innerhalb des Betrachtungsraums der Groblayoutplanung eines Volumenherstellers der Automobilindustrie in Kapitel 2.6 der Untersuchungsbedarf zusammengefasst. Antwort auf diesen Bedarf soll die intuitive digitale Fabriklayoutplanung sein.

Eine erste Übersicht der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung liefern *Schäfer und Bracht*. Sie verstehen darunter „eine Planungsmethodik [...], welche die Integration von hierarchisch und fachlich unterschiedlichsten Akteuren in den direkten Planungsvorgang durch den Abbau von Komplexitätshürden anstrebt und in einer digitalen Umgebung umgesetzt wird“ [Schäfer und Bracht 2018, S. 613].

Dieser Ansatz ergibt demnach in Verbindung mit der Definition der intuitiven Planung (Kapitel 2.4.2) und der Beschreibung der digitalen Layoutplanung (Kapitel 2.3.3) mehrere Eigenschaften der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung. *Schäfer und Bracht* identifizieren diese als die Einfachheit der Bedienung, die Schnelligkeit der Planung und die digitale Durchgängigkeit [Schäfer und Bracht 2018, S. 614]. Diese Merkmale werden im Folgenden aufgegriffen und erläutert sowie anschließend in einer Definition der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung zusammengeführt.

3.1.1 Einfachheit der Bedienung

Der Abbau von Komplexitätshürden durch die einfache Bedienbarkeit ist ein wesentliches Ziel der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung. Einfache Bedienbarkeit setzt sich aus der Zugänglichkeit und der Nutzbarkeit ohne Schulung zusammen.

Die Zugänglichkeit, also die Gebrauchstauglichkeit in Bezug auf eine möglichst weit gefasste Gruppe von Menschen (vgl. Kapitel 2.4.1), erlaubt es, ohne Expertenwissen die intuitive digitale Fabriklayoutplanung zu nutzen. Um diesen Aspekt noch weiter zu fördern, ist die intuitive digitale Fabriklayoutplanung so aufgebaut, dass keine Schulungen mehr für die Benutzung notwendig sind. Sie ist daher selbsterklärend, übersichtlich und benutzerfreundlich gestaltet. Zusätzlich ist eine Eingabeform zu wählen, die ein gemeinsames Arbeiten an einer Aufgabe

ermöglicht. Die Durchführung von umfangreichen Fabrikplanungsvorhaben muss daher nicht zwangsläufig domänenspezifisch unterteilt und kooperativ bearbeitet werden, sondern kann kollaborativ erfolgen. Akteuren mit unterschiedlichem Vorwissen sowie hierarchischer oder fachlicher Funktion können somit unmittelbar am Planungsvorgang mitwirken.

Die Einfachheit der Bedienung, mit den wesentlichen Ausprägungen Zugänglichkeit und Schulungsfreiheit, spiegelt damit die Intuitivität als Merkmal der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung wider. Während der Planung tritt somit die Methodenkompetenz in den Hintergrund, damit die Fachkompetenz und das implizite Wissen des Planers besser eingebracht werden kann. **Abbildung 3-2** zeigt die wichtigsten Eigenschaften für eine einfache Bedienung.

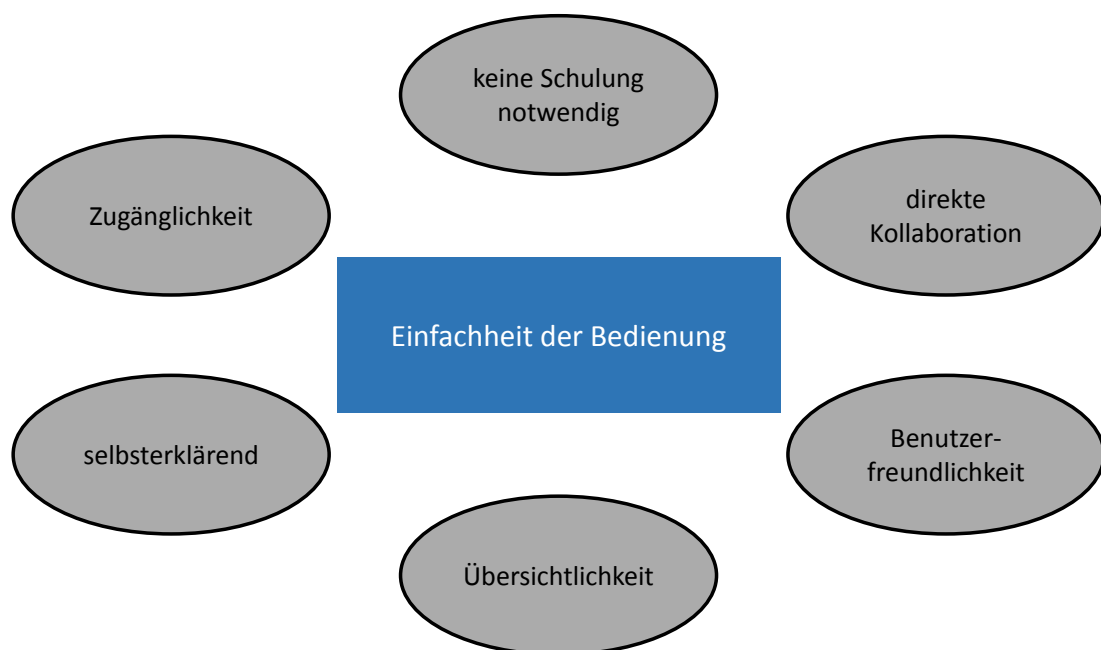


Abbildung 3-2: Forderungen zur "Einfachheit der Bedienung"

3.1.2 Schnelligkeit der Planung

Die Spontaneität bei der Planung, im Sinne der zeitlich direkten Verfügbarkeit der Methode oder des Werkzeugs sowie der Möglichkeit, kreative Ideen direkt umsetzen zu können, ist eine zentrale Eigenschaft der intuitiven digitalen

Fabriklayoutplanung. Sie leitet sich aus den Merkmalen „Affekt“ und „Geschwindigkeit“ der Intuition her (vgl. Kapitel 2.4.1) und ist auch Teil der intuitiven Planung (vgl. Kapitel 2.4.2).

Die zeitlich direkte Verfügbarkeit ist wesentlich von der benötigten Zeit bzw. dem Aufwand der Vor- und Nachbereitung einer Layoutplanung abhängig. Die Umsetzung spontaner Ideen, geprägt durch die Merkmale „unbewusste Informationsverarbeitung“ und „holistische Assoziationen“ (vgl. Kapitel 2.4.1), ist darauf angewiesen, ohne Hemmnisse durchgeführt zu werden. Langwierige Informationsbeschaffung oder umständliche, komplexe Vorbereitungsschritte bremsen die Umsetzung und damit die immanente Kreativität der Ideen. Ebenso ist die Nachbereitung hinderlich bei der schnellen Weitergabe der Ergebnisse.

Die beschriebene Verfügbarkeit kann unterteilt werden. Dies ist zum einen das Vorhandensein einer einsatzbereiten Planungsressource (Ressourcenverfügbarkeit) und zum anderen der Zugriff auf zur Planung notwendige Daten (Datenverfügbarkeit). Die intuitive digitale Fabriklayoutplanung muss daher so gestaltet sein, dass sie hardwareunabhängig einsetzbar ist. Somit wird sichergestellt, dass die Planung nicht an eine bestimmte Ressource gebunden und mit möglichst vielen digitalen Endgeräten einsetzbar ist. Des Weiteren ist eine direkte Anbindung an entsprechende Datenquellen vorzusehen, um die Zeit der Informationsbeschaffung und ähnliche Tätigkeiten zu reduzieren, die Einbindung von Best-practice Lösungen zu ermöglichen, eigene Elemente zur Wiederverwendung abzuspeichern und somit Ideen schnell in ein digitales Layout übertragen zu können. Diese verschiedenen Eigenschaften beschreiben zusammen die Schnelligkeit der Planung (**Abbildung 3-3**).

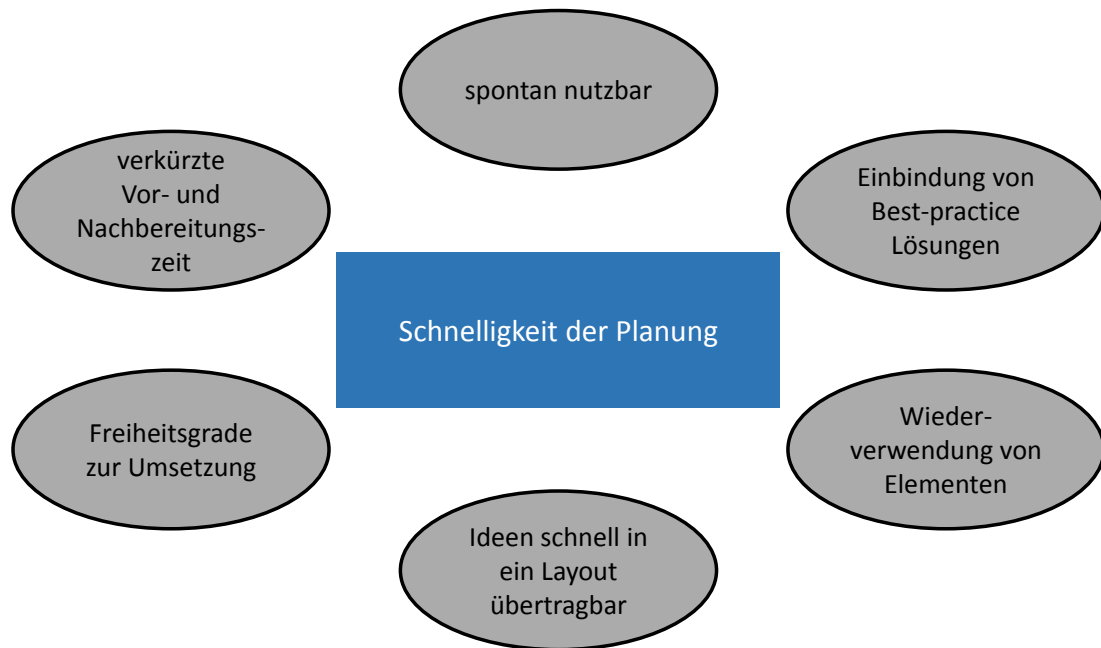


Abbildung 3-3: Forderungen zur "Schnelligkeit der Planung"

3.1.3 Ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung

Die Umsetzung in einer ganzheitlichen und möglichst nativen digitalen Systemwelt ist eine weitere charakteristische Eigenschaft der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung. Sie ist erforderlich, da der notwendige Variantenreichtum des Szenario-Managements nur durch ein anforderungsgerechtes Datenmanagement sinnvoll gehandhabt werden kann. Es müssen nicht nur Varianten und Versionen der Layouts verwaltet werden, es ist auch erforderlich, Elemente verschiedener Pläne in unterschiedlichen Kombinationen miteinander verbinden zu können, um zukunftsrobuste Pläne zu erstellen (vgl. Kapitel 2.2.1). Gerade da einzelne Inhalte mehrfach und in wechselnden Zusammensetzungen verwendet werden, muss das Datenmanagement die Vermeidung von Inkonsistenzen und Redundanzen sicherstellen, etwa indem Pläne sinnvoll ineinander referenziert werden, um Dopplungen von mehrfach genutzten Elementen zu verhindern. Zudem erfordert der hohe Abstimmungsbedarf in der frühen Phase aufgrund der Parallelisierung (vgl. Kapitel 2.2.2) und der Iterationen im Ablauf der Layoutplanung (vgl. Kapitel 2.2.3) eine ungehinderte digitale Durchgängigkeit. Damit werden Medienbrüche

vermieden und sowohl die direkte Weitergabe und Nutzung der Planungsergebnisse als auch die unmittelbare Verwendung bereits vorliegender Daten ermöglicht.

Gewährleistet wird die digitale Durchgängigkeit durch die syntaktische Interoperabilität, welche grundsätzlich durch Konvertierungen oder eine gemeinsame Datenbasis umgesetzt werden kann (vgl. Kapitel 2.3.2). Wie jedoch in Kapitel 3.1.2 ausgeführt ist die Schnelligkeit der Planung ein kritisches Merkmal der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung, weshalb die direkte Anbindung an eine Datenquelle vorgesehen wird. Die syntaktische Interoperabilität wird daher bei der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung folgerichtig durch eine gemeinsame Datenbasis mit der Systemumwelt realisiert. Konvertierungen mit dem ggf. einhergehenden Informationsverlust treten somit nicht auf. **Abbildung 3-4** zeigt die Eigenschaften dieser ganzheitlichen Daten- und Planungsumgebung.

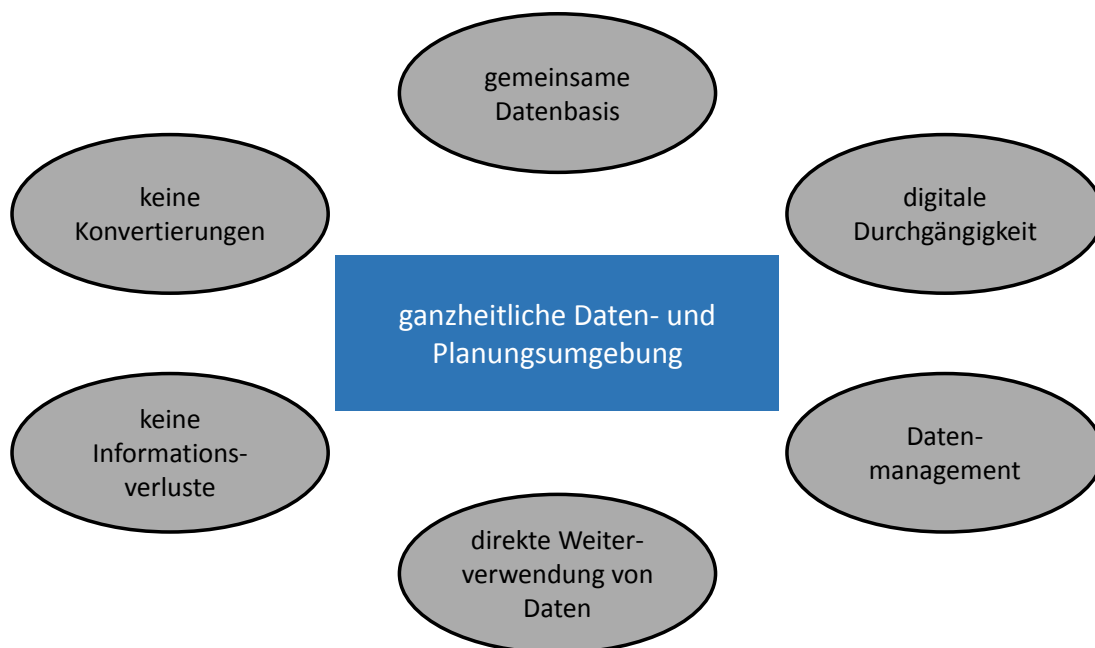


Abbildung 3-4: Forderungen zur "ganzheitlichen Daten- und Planungsumgebung"

3.1.4 Definition

Die in den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.3 dargestellten charakteristischen Eigenschaften ergeben bereits ein detailliertes Bild der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung. Zusätzlich zu diesen Ausführungen muss noch die Eignung hinsichtlich der eingangs

geschilderten Grundlagen der Layoutplanung gesichert werden. Dazu gehört neben der Unterstützung zur Erreichung der Ziele der Layoutplanung (vgl. Kapitel 2.2.1) die Zweckmäßigkeit für den Ablauf (vgl. Kapitel 2.2.3) und die Berücksichtigung der Besonderheiten der frühen Phase (vgl. Kapitel 2.2.4). Die zentralen Eigenschaften der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung stellt **Abbildung 3-5** dar.

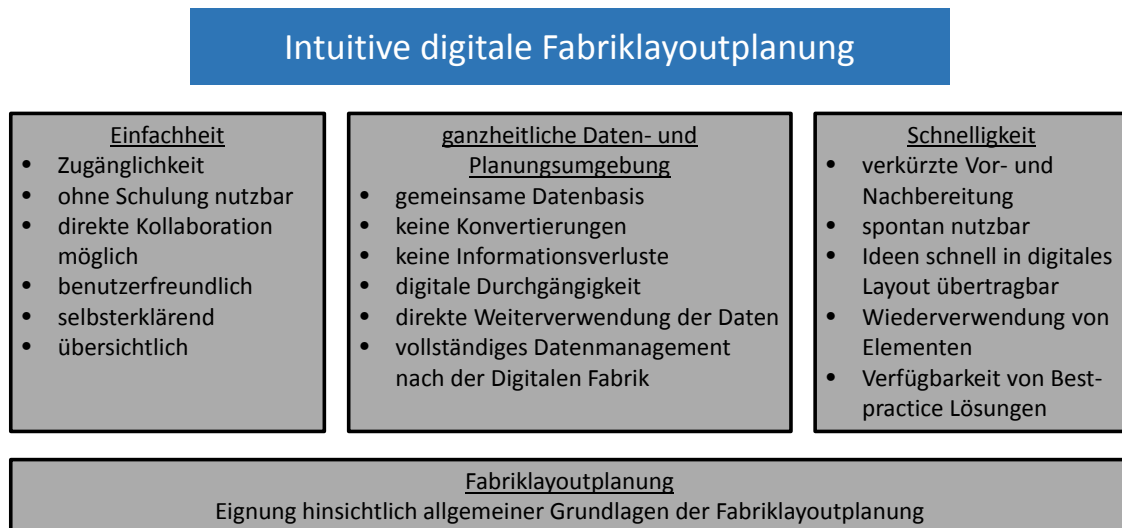


Abbildung 3-5: Zentrale Eigenschaften intuitiver digitaler Fabriklayoutplanung [in Anlehnung an Schäfer und Bracht 2018, S. 614]

Die intuitive digitale Fabriklayoutplanung wird durch vier zentrale Eigenschaften beschrieben, welche aus den Beschreibungen der Intuitivität und der Intuition, der Definition der intuitiven Planung sowie der Digitalen Fabrik abgeleitet sind. Basis ist die Eignung hinsichtlich allgemeiner Grundlagen der Layoutplanung. Diese zentralen Eigenschaften lassen sich zu einer umfassenden Definition zusammenführen:

Die intuitive digitale Fabriklayoutplanung ist eine Methode, die sich durch Einfachheit der Bedienung, Schnelligkeit der Planung und Ganzheitlichkeit der Daten- und Planungsumgebung auszeichnet.

Ihr Fokus liegt auf der kreativen Planung und der Entfaltung der Fachkompetenz des Anwenders. Ziel ist die Integration von Entscheidungsträgern aber auch von fachlich unterschiedlichsten Akteuren in den direkten Planungsvorgang mittels des Abbaus von Komplexitätshürden und somit die Intensivierung der Abstimmung in der frühen Phase der Fabrikplanung. Realisiert wird dies durch die digitale Durchgängigkeit, welche durch eine gemeinsame Datenbasis mit der Systemumwelt umgesetzt wird. Die intuitive digitale Fabriklayoutplanung unterstützt damit die Lösungsfindung bei der Gestaltung zukünftiger Fabriklayouts.

Die intuitive digitalen Fabriklayoutplanung ist somit ein umfassendes Konzept und unterstützt somit den gesamten Planungsablauf der frühen Fabriklayoutplanung (**Abbildung 3-6**).

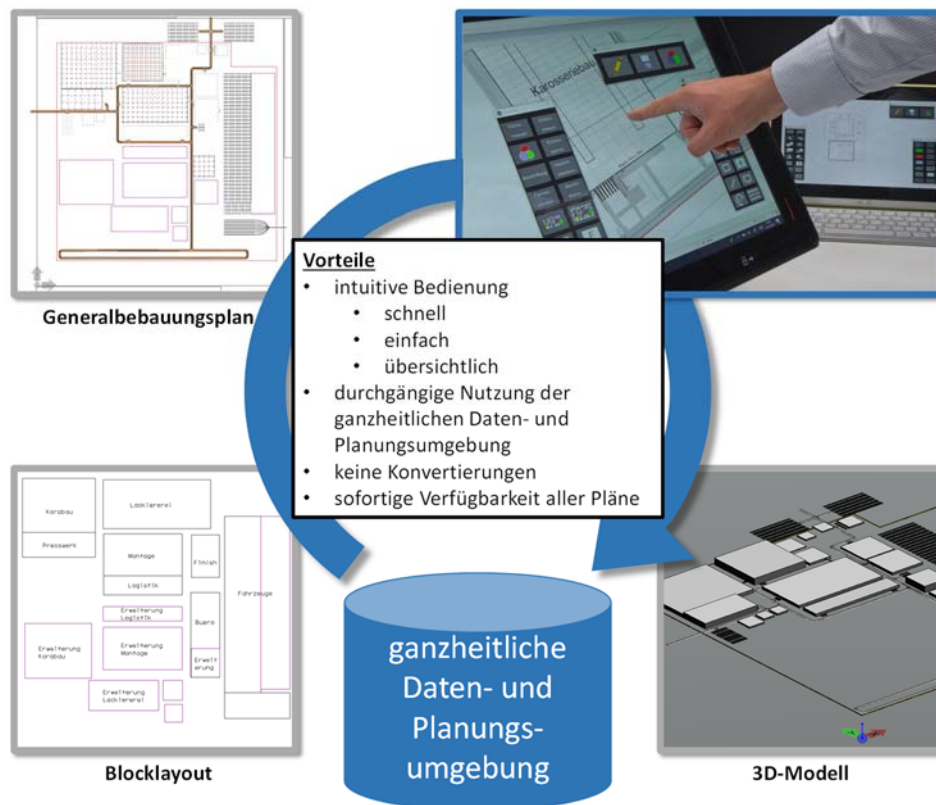


Abbildung 3-6: Ablauf intuitive digitale Fabriklayoutplanung [in Anlehnung an Schäfer und Bracht 2018, S. 614]

Die zugrundeliegende ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung wird durchgehend verwendet. Somit werden Systembrüche vermieden und Konvertierungen nicht benötigt. Die Erstellung der Layouts erfolgt nach den Detaillierungsstufen der 3D-CAD-Planung (vgl. Kapitel 2.3.3). Von der Entwicklung eines ersten 2D-Blocklayouts über die Generalbebauungsplanung kann die intuitive Benutzeroberfläche eingesetzt werden. Endergebnis ist ein Fabriklayout, das ggf. durch die Verwendung einer Objektbibliothek bis zum 3D-Modell ausgeführt werden kann. Die Layouts liegen während des gesamten Prozesses in der Daten- und Planungsumgebung vor, wodurch eine sofortige Verfügbarkeit aller Pläne sichergestellt ist.

3.2 Beschreibung des Anwendungsbereichs

Die durch die intuitive digitale Fabriklayoutplanung entwickelten Varianten erreichen hinsichtlich des spezifischen Zielprofils (vgl. Kapitel 2.2.1) in der Regel unterschiedliche Erfüllungsgrade. Da bei konkurrierenden und nicht immer quantifizierbaren Zielen keine eindeutig optimale Lösung existiert, müssen Layoutvarianten systematisch bewertet und verglichen werden.

Dieser Bewertung liegen Kriterien zugrunde, welche das Zielprofil widerspiegeln und je nach Zielhierarchie unterschiedlich gewichtet werden. Im Folgenden werden in Anlehnung an *Wiendahl* (vgl. Kapitel 2.2.1) die Zielfelder Materialfluss und Logistik, Wandlungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit beschrieben sowie die Layoutauswahl erläutert.

3.2.1 Zielfelder der Planung

3.2.1.1 Materialfluss und Logistik

In dem Feld Materialfluss und Logistik ist es in der frühen Planungsphase das Hauptziel, eine gute Anbindung aller Gebäude und Flächen an die Haupttransportachsenachsen (vgl. Kapitel 2.2.3.3) des Werks zu gewährleisten. Dabei sind die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Produktionsbereiche zu berücksichtigen.

Allgemein gilt es, Kreuzungen der verschiedenen Flüsse von Personal, Material und Produkt zu vermeiden, um keine eventuellen Staupunkte entstehen zu lassen. Die im Falle eines Automobilwerks vorliegende feste Produktionsreihenfolge ergibt starre Flussbeziehungen mit einem unidirektional gerichteten Materialfluss. Die Gewerke sind dementsprechend in einer Reihe miteinander verknüpft (vgl. auch Abbildung 2-11). Der Produktionsfluss zwischen Gewerken wird zumeist mit Fördertechnikbrücken realisiert, wodurch eine Entkopplung zur Logistikebene gegeben ist. Personalflüsse werden vom Materialfluss durch den Zugang von verschiedenen Seiten des Werks und eigene Tore getrennt. Kreuzungsverkehre werden so vermieden.

Im Vordergrund der Bewertung der Generalbebauungsplanung eines Automobilwerks hinsichtlich Materialfluss und Logistik steht daher die Zugänglichkeit der Gebäude und der Logistikbereiche sowie die Infrastruktur für die werksexterne Logistik. Diese nimmt bei einem Automobilwerk eine wichtige Rolle ein, da die Versorgung durch die Lieferkonzepte Just-in-Time (JIT) und Just-in-Sequence (JIS) eine hohe Lieferfrequenz und somit viel LKW-Fahrverkehr zur Folge hat. Die JIT/JIS-Teile machen bereits etwa 30 % des Versorgungsvolumens der Montage aus [Klug 2018, S. 9]. Die zunehmende Modularisierung von Fahrzeugen und eine bereits auf unter ein Viertel gesunkene Fertigungstiefe [VDA 2015, S. 60] führen zu einer Verlagerung des Schwerpunktes vieler Automobilwerke zu der Montage. Durch die stetig zunehmende hohe Relevanz der Logistik löst diese die Produktion als entscheidender Faktor bei der Fabriklayoutplanung ab. Dies äußert sich unter anderem in besonders auf die Logistik angepassten Montagehallen. **Abbildung 3-7** zeigt ein Konzept zur Optimierung der Logistikleistung der Montage.

Das Konzept wurde bei der Montagehalle des BMW Werks Leipzig (**Abbildung 3-8**, Montagehalle auf der rechten Seite) umgesetzt. Gegenüber der konventionellen rechteckigen Form der Montage unterscheidet sich dieses Gebäude durch seine „Finger“, in welchen das Montageband positioniert ist. Neben guten Erweiterungsmöglichkeiten wird durch das „Kamm-Konzept“ somit vor allem die optimale Zugänglichkeit des Bandes für die Direktanlieferung von JIS und JIT-Teilen durch LKWs realisiert. Bei rechtwinkliger Anordnung der „Finger“ entsteht das „Plus-Konzept“ (**Abbildung 3-9**).

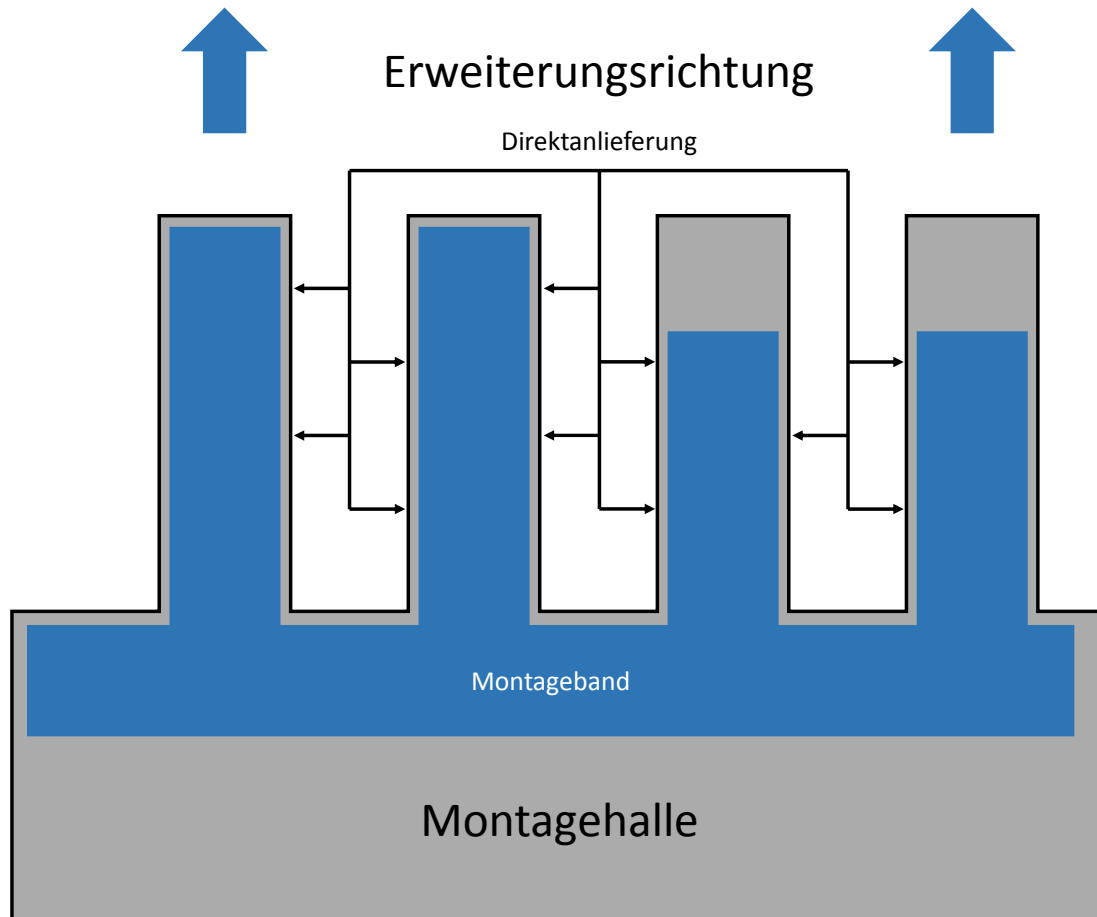


Abbildung 3-7: Kamm-Konzept der Montagehalle des BMW Werks Leipzig [nach Bauer 2006, S. 184]



Abbildung 3-8: BMW Werk Leipzig [Quelle: BMW AG]

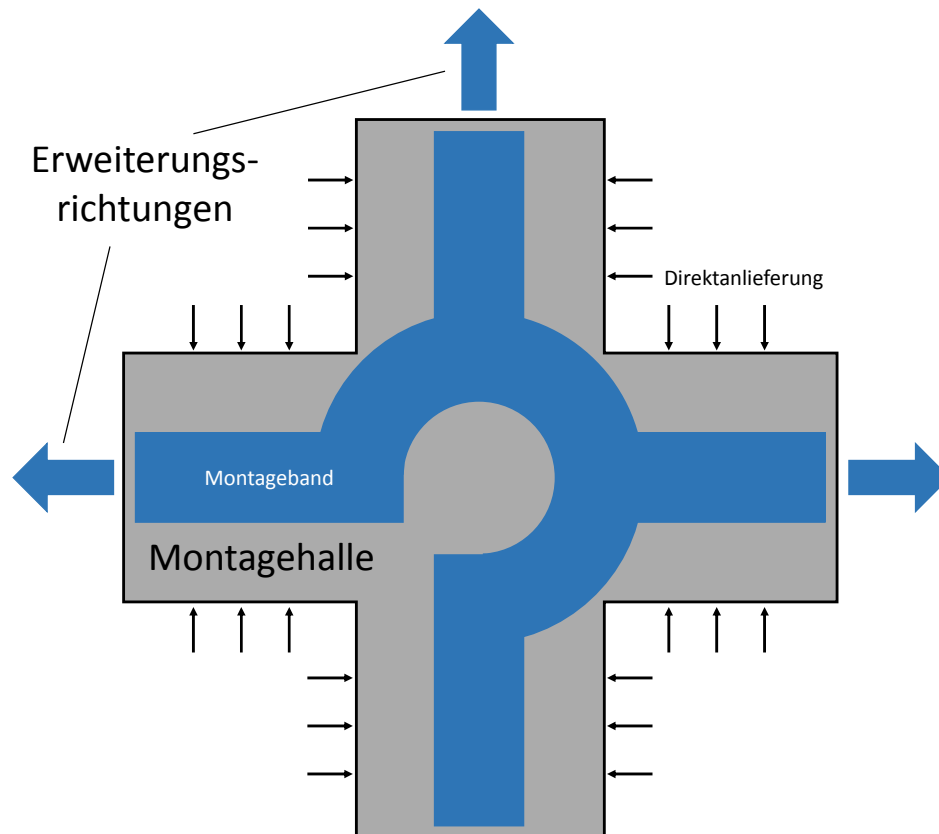


Abbildung 3-9: Plus-Konzept der Endmontage des Smart Werks Hambach [in Anlehnung an Daimler AG 2018b]



Abbildung 3-10: Smart Werk Hambach [Quelle: Daimler AG]

Das Smart Werk Hambach (**Abbildung 3-10**) nutzt das „Plus-Konzept“, um das hohe Logistikaufkommen aufgrund der außergewöhnlich niedrigen Fertigungstiefe von nur ca. 10 % [Fritz et al. 2011] zu bewältigen. In den vier Ausläufern des Zentralgebäudes, genannt „Äste“, findet die Endmontage statt. Durch die offene Gestaltung und die langen Außenwände können JIT und JIS-Teile möglichst nah an die entsprechende Montagestation geliefert werden [Daimler AG 2018b]. In den Zwischenflächen der „Äste“ finden zudem Zulieferbetriebe Platz. In ähnlicher Weise wurde die „Plus-Form“ auch schon 1989 im heute geschlossenen Volvo Werk Uddevalla eingesetzt [Berggren 1993]. Eine Kombination des „Kamm“- und des „Plus-Konzepts“ wird im Werk Rüsselsheim der Adam Opel GmbH genutzt (**Abbildung 3-11**).



Abbildung 3-11: Opel Werk Rüsselsheim [Quelle: Opel]

Durch das in der Abbildung zu erkennende „Halbstern-Konzept“ wird die Außenfläche gegenüber einer rechteckigen Montagehalle wesentlich vergrößert. Es finden somit erheblich mehr LKW-Docks für den Warenumschlag Platz, wodurch die Logistikleistung der Montagehalle gesteigert wird. Gleichzeitig benötigt dieses Konzept weniger Fläche als die zuvor vorgestellten Konzepte, jedoch ist die Erreichbarkeit der Montagestationen als weniger gut zu bewerten. Welches der vorgestellten Konzepte genutzt werden sollte, hängt von spezifischen Zielprofil ab.

Bei der Entscheidung für eines dieser Konzepte spielt auch die räumliche Anordnung der Zählpunkte (auch Status- oder Erfassungspunkte genannt) eine große Rolle. Zählpunkte werden für die operative Fertigungs- und Materialflusssteuerung genutzt [Herlyn 2012, S. 138]. Sie dienen der Vorgabe und der Erfassung des Produktionsablaufs und ermöglichen die Synchronisation verschiedener Produktionsbereiche und externer Lieferanten. Erreicht etwa ein Fahrzeug einen bestimmten Zählpunkt, so wird über das JIS-System der Zulieferprozess für die Montagelinie in Gang gesetzt. Typische Zählpunkte im Automobilbau sind Rohbaustart, Rohbauende, Lackstart, Lackende, Einlauf Karossenlager, Auslauf Karossenlager, Einlauf Montagelinie [Klug 2018, S. 335]. Die optimale Positionierung dieser Zählpunkte zueinander sorgt für eine hohe Transparenz und in der Folge für eine gute Plan- und Steuerbarkeit der Produktion. Dazu wird meist eine räumlich enge Zusammenfassung der Zählpunkte angestrebt, um eine zentrale Koordination der Produktionsbereiche und der Logistik zu ermöglichen.

Diese Beispiele zeigen, welche maßgebliche Rolle die Logistik bei der Layoutplanung einnimmt. Übergeordnetes Ziel der logistikgerechten Fabrikplanung ist es, durch die Realisierung einer „Logistik der kurzen Wege“ Transport-, Umschlags- und Lageraufwand weitestgehend zu vermeiden [Klug 2018, S. 316]. Gerade im Hinblick auf den Wandel zur Elektromobilität ist davon auszugehen, dass durch die sinkende Fertigungstiefe und die stärkere Modularisierung der Fahrzeuge die logistischen Kriterien in der Fabriklayoutplanung weiterhin einen sehr hohen oder steigenden Stellenwert haben werden.

3.2.1.2 Wandlungsfähigkeit

Die Bewertung der Wandlungsfähigkeit beschäftigt sich mit der Einschätzung der Möglichkeiten einer Fabrik, sich in den verschiedenen Ebenen bei Änderungen der äußeren Einflüsse anzupassen. Dazu existieren verschiedene Vorgehensweisen [vgl. u.a. Heger 2007; Klemke 2014], welche sich auf die Betrachtung einzelner Fabrikobjekte und deren Beziehungen zum Umfeld stützen.

Grundsätzlich geht es bei der Planung der Wandlungsfähigkeit um die Entwicklung geeigneter Maßnahmen, die den Weg zu mehreren Zukunftsbildern der Fabrik ermöglichen (vgl. Kapitel 2.2.1). Das kann im Automobilbau konkret die Integration von neuen Produkten, innovativen Produktionsphilosophien oder -technologien sein.

Festzuhalten ist hierbei, dass die Veränderungen durch die Elektromobilität vornehmlich den Karosseriebau und vor allem die Montage betreffen werden. Diese Gewerke verarbeiten neue Komponenten und auch die Aufbaureihenfolge der Fahrzeuge ändert sich. Grundsätzlich wird bei dieser Umstellung ein hoher Grad der Wiederverwendung angestrebt [Ulbrich 2018, S. 20]. Dies setzt eine hohe Wandlungsfähigkeit der Fabrik voraus.

Hier ist vor allem der Wandlungsbefähiger „Erweiter- und Reduzierbarkeit“ (vgl. Kapitel 2.2.1) der Produktionshallen gefordert. Durch den Wandel zur Elektrofahrzeugproduktion verringert sich gegenüber einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor die notwendige Montagefläche aufgrund der niedrigeren Teileanzahl: Im Antriebsstrang reduziert sich die Anzahl der benötigten Bauteile von etwa 1400 auf nur noch rund 210 [Kampker 2014, S. 17]. Da zudem durch den Einkauf von Batteriezellen und Elektromotoren die Fertigungstiefe generell sinkt, verändern sich auch die Platzbedarfe anderer Produktionsbereiche. Neu hinzu kommen werden Havarieflächen für Probleme oder Fehler der Batteriezellen: Durch die hohe Energiedichte der verbauten Zellen sind besondere Sicherheitsvorschriften einzuhalten. So ist die im Fehlerfall freiwerdende thermische Energie einer Lithium-Ionen-Zelle etwa um das sechsfache höher als die elektrisch nutzbare Energie der Zelle („venting with flame“ / thermisches Durchgehen, siehe beispielsweise [Jossen und Weydanz 2006, S. 133]). Dies erfordert für diese Extremfälle Bereiche, in denen Fahrzeuge oder Batteriemodule abgestellt werden und die chemischen Reaktionen kontrolliert ablaufen können. Diese Bereiche müssen von den Produktions- und Lagerbereichen gut und schnell zu erreichen sein und sind daher in die Fabrikstrukturen zu integrieren.

Die in dieser Arbeit vorrangig betrachtete räumliche Art der Wandlungsfähigkeit der Generalstruktur (vgl. Abbildung 2-4) und der Wandlungsbefähiger

„Erweiter- und Reduzierbarkeit“ lässt sich durch einige Kriterien bewerten, welche im Folgenden dargestellt werden.

Hinsichtlich der Gewährleistung der Wandlungsfähigkeit bei der räumlichen Gestaltung ist es sinnvoll, nicht wandelbare (bzw. nur schwer wandelbare) Objekte an den Rand der Fläche, welcher nicht in der Erweiterungsrichtung liegt, zu positionieren. Diese Objekte werden als Fixpunkte [Wirth et al. 2000, S. 66], Zwangspunkte [Reichardt und Gottswinter 2004, S. 53], Fixpunkte [Aggteleky 1990, S. 473; Pawellek 2014, S. 196; Wiendahl et al. 2014, S. 185; Bischoff 2016, S. 27] oder Monumente [Erlach 2017, S. 12-13] bezeichnet. **Abbildung 3-12** zeigt drei Möglichkeiten, wie Fixpunkte im Layout angeordnet werden sollten.

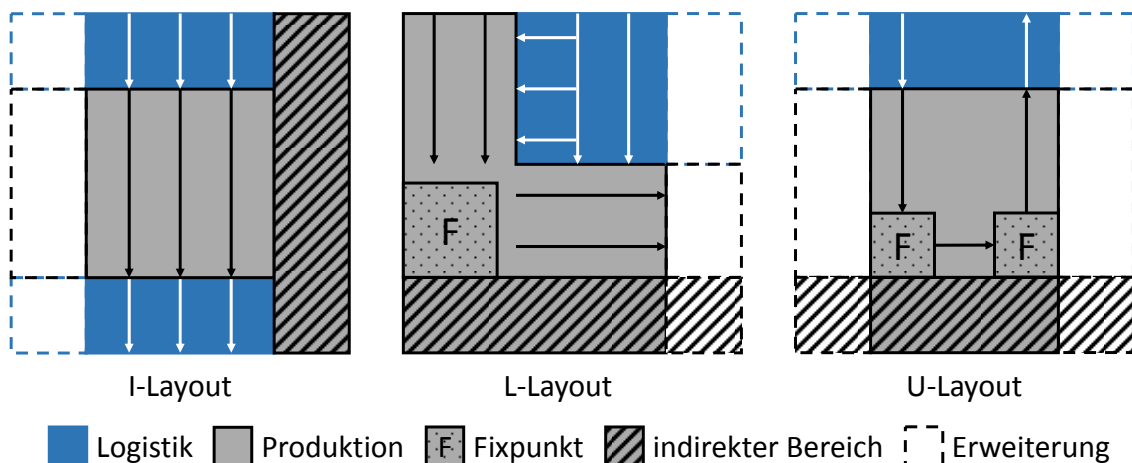


Abbildung 3-12: Grundlegende Materialflussstruktur in Abhängigkeit von Fixpunkten [in Anlehnung an Erlach 2017, S. 12]

In den I-, L- und U-Layouts, welche drei grundsätzliche Anordnungsvarianten darstellen, erfolgt die Positionierung von Fixpunkten und indirekten Bereichen, wie Verwaltung oder Instandsetzung, außerhalb der Mitte der zur Verfügung stehenden Fläche. Somit sind spätere Erweiterungen (gestrichelt dargestellt) möglich, welche keine Änderungen der bestehenden Anordnung erfordern und die Fabrikstruktur nicht nachteilig beeinflussen.

Während für ein Produktionslayout Fixpunkte zum Beispiel Zu- und Abgänge, Maschinenfundamente, Tore oder im Raum stehende Stützen sein können, sind diese Punkte bei einem Fabriklayout nicht so eindeutig zu identifizieren. Eine Möglichkeit ist es daher, eine Unterscheidung der Werksachsen in „harte“ und

„weiche“ Achsen vorzunehmen [Pawellek 2014, S. 154-155], was sich auch in der Einteilung der Funktionszonen widerspiegelt (vgl. Kapitel 2.2.4).

„Weiche“ Achsen gewährleisten Wandlungsfähigkeit durch „Erweiter- und Reduzierbarkeit“. Sie sollten genutzt werden, um die Produktions- und Logistikbereiche einzuplanen. Wo hingegen keine Änderungen zu erwarten sind oder aufwendige Gebäude- und Anlagentechnik installiert werden muss, sollten „harte“ Achsen vorgesehen werden. Sie bilden das Pendant zu Fixpunkten im Produktionslayout und sollten an den Flanken des Werksgeländes angeordnet werden (**Abbildung 3-13**).

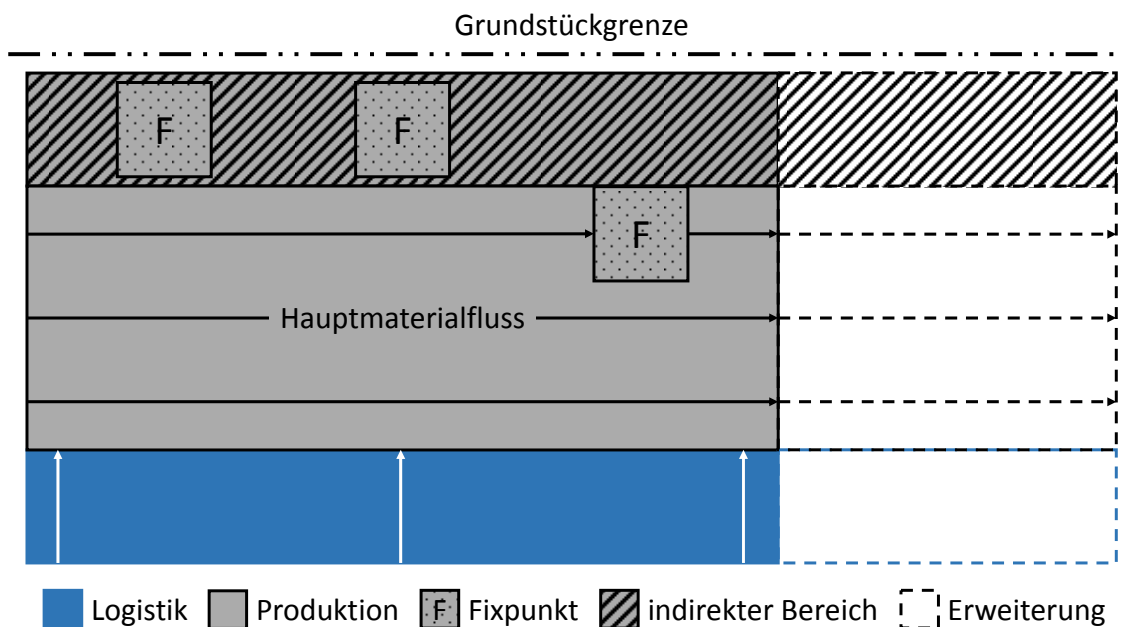


Abbildung 3-13: Führung des Hauptmaterialflusses und Positionierung der Fixpunkte im Fabriklayout [in Anlehnung an Bischoff 2016, S. 23]

Die Fixpunkte können hier schwer versetzbare Installationen, etwa Transformatoren oder Lackierstraßen, oder indirekte Bereiche, wie Verwaltungsflächen, sein, bei denen keine strukturellen Änderungen zu erwarten sind. Durch die Ausrichtung der Hauptmaterialflüsse parallel zu benachbarten Grundstücksgrenzen, muss im Falle einer Erweiterung die Hauptmaterialflussrichtung nicht geändert werden. Dadurch wird die Skalierbarkeit des Layouts sichergestellt.

Um diese Erweiterungsmöglichkeiten bestmöglich ausnutzen zu können, erfolgt die Planung des gesamten Fabriklayouts in einem Industrieraster, welches durch ein quadratisches Gitternetz auf dem Grundstück gebildet wird [Grundig 2018, S. 159-160]. Als Rastermaß (Kantenlänge) sollte dabei ein Vielfaches des Baurichtmaßes bzw. der Baunormzahlen [DIN 4172, S. 4-5] gewählt werden (vgl. Kapitel 3.2.1.3). Dieses Raster ist Grundlage der Positionierung aller Fabrikelemente und der Einteilung der Funktionszonen und sollte den spezifischen Gegebenheiten der Planung angepasst sein. Bei der Infrastrukturplanung zeigt es sich u.a. in der rechtwinkligen Straßenführung, bei der Bauplanung in langen Gebäudefluchten. Die Bebauung in diesem Raster gewährleistet auf lange Zeit eine Erweiterungsfähigkeit, da zukünftige Gebäude oder Gebäudeerweiterungen segmentweise ergänzt werden können.

Innerhalb der auf dem Fabrikgelände zu errichtenden Industriebauten setzt sich dieses Industrieraster fort, so dass sich in den Hallen einzelne Felder bilden, welche dem Stützenraster der Halle entsprechen. Bei großen Rastermaßen bietet es sich dabei an, das Raster in Innenbereichen weiter zu unterteilen. Bedingt durch die Eigenschaften der im Industriebau häufig genutzten Stahlbaukonstruktion sind dabei auch rechteckige Raster mit unterschiedlichen Kantenlängen gängig [DSTV 2000] (vgl. Kapitel 3.2.1.3). Bei großen Hallen, wie sie im Automobilbau üblich sind, dienen die alphanumerische Bezeichnung der Felder zudem als Ortsangabe im Produktionslayout.

Für eine wandlungsfähige Gebäudestruktur gilt es eine generische Konstruktion anzustreben, um nicht nur dem initialen Produktionslayout gerecht zu werden, sondern bei späteren Anpassungen einen möglichst großen Gestaltungsraum sicherzustellen. Dies wird vornehmlich durch eine optimierte Positionierung (s.o.) oder gänzliche Vermeidung der zuvor beschriebenen Fixpunkte realisiert. Dies ist neben der Boden- bzw. Deckentraglast einer der Gründe, wieso in Produktionsbereichen nach Möglichkeit der Bau mehrerer Etagen vermieden wird. Durch die notwendigen Bodendurchbrüche für die beispielsweise im Automobilbau sehr aufwendige Fördertechnik würden unveränderbare Fixpunkte entstehen, welche eine langfristige Umgestaltung erschweren.

Ferner sollten Medienanschlüsse flexibel und redundant vorgesehen werden, um eine freie Positionierung der Maschinen und Anlagentechnik zu ermöglichen. Dazu gehören auch entsprechende Datenleitungen, die analog zu den Medienleitungen flexible Anschlusspositionen der Technik erlauben müssen. Dies betrifft einerseits Industrie 4.0-Anwendungen im Produktionsbereich, andererseits aber auch zunehmend Sensoren für die smarte Fabrik im Gebäude, wie sie bereits in der ETA-Fabrik der TU Darmstadt [Abele et al. 2016] eingesetzt werden.

Der große Bedarf an Wandlungsfähigkeit zeigt sich anhand der grundsätzlich neuen Ideen, die von der Fabrikplanung entwickelt werden. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Logistik im Automobilbau (vgl. Kapitel 3.2.1.1) entwickelt die BMW AG unter dem Projektnamen „Flex-Hub“ eine mobile Logistikhalle, mit welcher auf Nachfrageschwankungen reagiert werden soll (**Abbildung 3-14**).



Abbildung 3-14: Flexible Logistikhalle "Flex-Hub" (Computergrafik) [Quelle: BMW AG] / [Dobos 2017, S. 47]

Die global einsetzbare Halle kann abgebaut und transportiert werden und ist standardisiert, so dass mehrere dieser mobilen und modularen Hallen zu einem großen Logistikkomplex zusammengesetzt werden können. Zudem verfügt sie über die notwendige Gebäudetechnik, Büro- und Pausenräume [Dobos 2017, S. 47]. Durch den geringen Aufwand bei der Anpassung an externe Veränderungen trägt dieses Projekt zur Wandlungsfähigkeit einer Fabrik bei.

Das Zielfeld der Wandlungsfähigkeit kann in Konkurrenz zu anderen Zielfeldern, insbesondere der kurzfristigen Wirtschaftlichkeit, stehen. Auf niedrigeren Strukturierungsebenen wird dieser Zielkonflikt bei der Abwägung von Flexibilität und Effizienz deutlich [Brecher 2011, S. 315]. Bei der Fabriklayoutplanung kommt es hingegen meist zu einer Gegenüberstellung des Einflusses der Erweiterbarkeit und des Flächennutzungsgrades eines Layouts: Die zur Erweiterung vorgehaltenen Bereiche beeinflussen den Flächennutzungsgrad und damit die Wirtschaftlichkeit negativ, sind jedoch für die Wandlungsfähigkeit notwendig.

Ebenso führt eine generische Hallenkonstruktion mit der pauschalen Bereitstellung von Medienanschlüssen etwa an jeder Stütze zu höheren Kosten als eine spezifische Auslegung der Gebäudetechnik für das initiale Produktionslayout. Gleiches gilt für die Wahl des Stützenrasters: Während im Sinne der Wandlungsfähigkeit beispielsweise ein 18 m × 18 m-Raster [Schönheit 2013, S. 86] oder gar ein 38 m-Tragwerk [Reichardt und Gottswinter 2004] empfohlen wird, so führt dies bei der Bewertung der Investitionen zu höheren Kosten als geringere Spannweiten.

Die tatsächliche Wandlungsfähigkeit einer Fabrik und damit der Nutzen der Wandlungsbefähiger zeigt sich erst während des langjährigen Betriebs. Auch kann es vorkommen, dass Maßnahmen zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit später nicht in vollem Umfang benötigt werden, wodurch eine Bewertung des Nutzens in der Planungsphase sehr schwierig und ggf. fälschlicherweise auf den initialen Planungsstand bezogen ist. Oftmals wird daher aufgrund eines scheinbar schlechten Kosten/Nutzen-Verhältnisses auf Wandlungsbefähiger verzichtet.

Somit sollten Kosten für die Wandlungsfähigkeit auch als Wandlungskosten in die Entscheidungsfindung einfließen, damit sie nicht fälschlicherweise als Anfangsinvestition missverstanden werden [Dombrowski et al. 2012, S. 131]. Die Kosten für Wandlungsbefähiger sind daher bei der Planung explizit als solche auszuweisen, damit die bei der Auswahl einer Layoutalternative (vgl. Kapitel 3.2.2) als solche berücksichtigt werden können.

3.2.1.3 Wirtschaftlichkeit

Das Zielfeld der Wirtschaftlichkeit umfasst verschiedene Bereiche, die es zu unterscheiden gilt. Allgemein bezeichnet die Wirtschaftlichkeit das Verhältnis zwischen Ertrag und Kosten. Bezogen auf die Fabriklayoutplanung ist der Ertrag von den zuvor dargestellten Zielfeldern Materialfluss und Logistik (Kapitel 3.2.1.1) sowie Wandlungsfähigkeit (Kapitel 3.2.1.2) abhängig. Die Kosten lassen sich in Betriebskosten und Investitionskosten der Fabrik unterteilen. Betriebskosten sind die im laufenden Betrieb anfallenden Kosten. Diese umfassen sowohl die Kosten für die Produktion, als auch die Kosten für den Unterhalt der Gebäude und Anlagen. Zum Großteil werden die späteren Betriebskosten durch die Detailplanung bestimmt, da zu diesem Zeitpunkt die konkreten Entscheidungen zum Einsatz von Technologien oder spezifischen Anlagentypen getroffen werden. Ebenso werden in dieser Phase bauliche Details festgelegt, die zum Beispiel über die Energieeffizienz eines Gebäudes mittelbar auf die Betriebskosten einwirken. Die Fabriklayoutplanung beeinflusst die Investitionskosten der späteren Fabrik vor allem durch Entscheidungen hinsichtlich Industrieraster, Gebäudegröße und Infrastrukturausbau.

Durch die Wahl eines standardisierten Rasters, bspw. nach den Baunormzahlen [vgl. DIN 4172, S. 5-6], kann auf Spezialanfertigungen von verschiedenen Bauelementen wie Fassaden- oder Tragwerksteilen verzichtet werden, wodurch eine entsprechende Kostenreduktion möglich ist. Hier gilt es zwischen einer Optimierung der Investitionskosten sowie der Anpassung sowie der Wandlungsfähigkeit des Gebäudes abzuwägen. Allgemein sollte hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Investitions- und Folgekosten angestrebt werden [Kochendörfer et al. 2018, S. 191]. Die Folgekosten umfassen dabei sowohl Wartung und Instandsetzung als auch die zuvor diskutierten Wandlungskosten (vgl. Kapitel 3.2.1.2).

Um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen, wird unter anderem versucht, die Kosten zu senken. Die Minimierung der Betriebskosten und der Investitionskosten kann jedoch einen Zielkonflikt ergeben, denn häufig sind beispielsweise für Maßnahmen zur Energieeffizienz zusätzliche Investitionen zu tätigen. Die Entscheidung für oder

wider solche Maßnahmen sind aufgrund des spezifischen Zielprofils des Fabrikplanungsfalls (vgl. Kapitel 2.2.1) zu treffen. Die Investitionskosten werden auch von den Kosten für Maßnahmen der Wandlungsfähigkeit beeinflusst. Jedoch dürfen Sie nicht ohne weiteres in die Kosten/Nutzen-Abwägungen mit eingehen, wie in Kapitel 3.2.1.2, Seite 83 beschrieben.

Da sich die intuitive digitale Fabriklayoutplanung nach ihrer Definition (Kapitel 3.1.4) auf die frühe Phase bezieht und in dieser vorrangig die Investitionen festgelegt werden, sollen im folgenden Bewertungsansätze für die Investitionskosten betrachtet werden. Auf der Anlagenseite geschieht dies durch die unterschiedlichen Verfahren der Investitionskostenrechnung. Auf der Seite des Industriebaus wird die Vorausberechnung der Kosten als Kostenermittlung bezeichnet [DIN 276-1, S. 4].

In der frühen Phase müssen die Investitionskosten durch Schätzverfahren berechnet werden, da noch keine Angebotspreise vorliegen. Die drei gebräuchlichsten Verfahren sind [Kochendörfer et al. 2018, S. 212]:

- Einzel-Wert-Verfahren
- Kostenflächenartenmethode
- Gebäudeelementmethode

Bei diesen Verfahren werden Kostenkennwerte herangezogen, welche sich aus dem Verhältnis zwischen den Kosten der Kostengruppen der DIN 276-1 und der einer Bezugseinheit ergeben. Diese Bezugseinheiten können geometrisch (beispielsweise Grundfläche oder Rauminhalt, siehe DIN 277-1) oder nutzungsabhängig (beispielsweise Anzahl Parkplätze) sein. Die Kostenwerte können aus öffentlichen Quellen, von kommerziellen Anbietern bezogen oder aus eigenen Projekten abgeleitet werden [Kochendörfer et al. 2018, S. 212]. Grundlage dieser Berechnungen ist das Blocklayout oder das flächenmaßstäbliche Funktionsschema (vgl. Kapitel 2.2.3).

Die Mehr-Wert-Verfahren berechnen die Kosten auf Basis mehrerer Bezugseinheiten. Diese liegen zu Beginn der Planung noch nicht vor. Daher ist das

Einzel-Wert-Verfahren für die frühe Phase anzuwenden. Im Industriebau werden bei diesem Verfahren ausschließlich die Kostengruppen 300 (Bauwerk - Baukonstruktionen) und 400 (Bauwerk - Technische Anlagen) betrachtet. Hier bietet sich an, für das Generalbetriebsschema das „systematische Flächenplanungssystem“ der VDI 3644 zu nutzen. Dieses gliedert ausgehend von der Grundstücksfläche alle Betriebsflächen des Werks auf und orientiert sich dabei an der DIN 277-1 und der alten, bereits zurückgezogenen, jedoch in vielen Bereichen noch im Einsatz befindlichen DIN 18227.

Um eine frühzeitige Bewertung verschiedener Varianten zu ermöglichen, sollte eine derartige Kostenermittlung nach dem Einzel-Wert-Verfahren auch schon während der Konzeptplanung möglich sein. Grundlage dafür ist eine Flächenauswertung, die dazu direkt in ein Werkzeug zur Layoutplanung zu integrieren ist. Diese würde auch eine Aufstellung der Flächenbilanz (vgl. Kapitel 2.2.3) erlauben.

3.2.2 Auswahl einer Layoutalternative

Nach der Entwicklung mehrerer Layoutvarianten gilt es, die beste Alternative anhand ihres Zielbeitrags hinsichtlich des spezifischen Zielprofils der Fabrik auszuwählen. Hierzu sind mehrere Kriterien (vgl. Kapitel 3.2.1) unter der gegebenen Zielhierarchie zu bewerten. Die Planung und der Vergleich vieler Varianten dienen dabei der Absicherung eines hohen Qualitätsniveaus bei der Bestimmung der Vorzugsvariante (vgl. Kapitel 2.2.3).

Zur Bewertung von Entscheidungsproblemen stehen zahlreiche Methoden zur Verfügung. Diese können je nach Anzahl der verfolgten Zielfelder in eindimensionale und mehrdimensionale sowie in qualitative und quantitative Verfahren unterschieden werden [Granig 2007, S. 67].

Aufgrund der Berücksichtigung mehrerer unterschiedlich gewichteter Zielfelder, die sich zudem in Konkurrenz zueinander befinden können, ist die Auswahl einer Layoutalternative ein multikriterielles Bewertungsproblem. Zudem sind sowohl qualitative Kriterien zu überprüfen (Vorhandensein bestimmter Eigenschaften) als auch quantitative Eigenschaften (beispielsweise Flächennutzungsgrad) mit

einzu beziehen. Es ist somit der Einsatz einer mehrdimensionalen Entscheidungsmethode notwendig, die sowohl qualitative als auch quantitative Kriterien bewerten kann.

Hierzu stehen zwei Verfahren zur Verfügung: Die Kosten-Nutzen-Analyse ermittelt Kosten und Nutzen von Planungsalternativen und stellt diese gegenüber. Die Nutzwertanalyse (NWA) bewertet qualitative Kriterien hinsichtlich der Zielerreichung. Sie kommt bei komplexen Entscheidungsproblemen zum Einsatz, bei denen die Kriterien nicht in Kosten bewertet werden können [Pawellek 2014, S. 58-59]. Dies betrifft insbesondere Zielfelder wie die Wandlungsfähigkeit (vgl. Problematik „Wandlungskosten“, Kapitel 3.2.1.2), weshalb die Nutzwertanalyse zur Layoutbewertung und -auswahl genutzt wird.

Die Nutzwertanalyse ist eine semiquantitative, mehrdimensionale Methode zur Multikriterienbewertung, welche auch als Scoring- oder Punktwertverfahren bezeichnet wird. Durch subjektive Einschätzung von Experten quantifiziert sie qualitative Kriterien und macht sie miteinander vergleichbar [Haag et al. 2011, S. 327]. Die bewerteten Kriterien sollten unabhängig voneinander sein [Pawellek 2014, S. 53]. Dadurch werden Überschneidungen und in der Folge Mehrfachbewertungen vermieden und die Aussagekraft der Nutzwertanalyse nicht verzerrt.

Quantitativ messbare Kriterien wie die Flächennutzung oder die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung können in den Auswahlprozess einbezogen werden. Die Gewichtung wird anhand des spezifischen Zielprofils der Fabrik (vgl. Kapitel 2.2.1) vorgenommen. Im Sinne einer zukunftsrobusten Planung sollte darauf geachtet werden, dass Lösungen für verschiedene Szenarien in den Layouts kombiniert werden. Die Auswahl erfolgt dann anhand des Zielerreichungsgrades hinsichtlich der gewählten Kriterien und Gewichtung.

Da die Quantifizierung qualitativer Größen kein eindeutiges Verfahren ist und stark von den Fähigkeiten und der subjektiven Sichtweise des Planers abhängt, ist es sinnvoll, sowohl die Durchführung als auch die Interpretation der Nutzwertanalyse in einem größeren Planungsteam mit mehreren Fachdisziplinen

durchzuführen. Ebenso ist der erzielte Nutzwert einer Alternative nicht als absoluter Wert, sondern in seinem Verhältnis zu anderen Ergebnissen zu sehen.

Des Weiteren existieren verschiedene Ansätze, welche versuchen, ausschließlich digital eine rechnergestützte Bewertung der Fabrik vorzunehmen [Wesebaum et al. 2016; Wesebaum und Mach 2016; Aurich et al. 2018]. Problematisch an dieser Herangehensweise ist, dass zur Bewertung der Kriterien jeweils eine mathematische Zielfunktion definiert wird, um sie im Sinne des Ansatzes digital verarbeiten zu können. Dies führt bei nicht quantifizierbaren oder nominal-skalierten Kriterien durch die mathematische Modellierung zu dem Anschein einer sehr hohen Präzision. Jedoch muss die Quantifizierung in diesen Fällen durch eine starke Vereinfachung und subjektive Einschätzung vorgenommen werden, was der Komplexität der Bewertung nicht gerecht wird.

In umfassenderen Modellen zur Bewertung von Fabrikstrukturen wird der Erfüllungsgrad eines Kriteriums durch Prozentwerte angegeben und somit quantifiziert [Schulze 2013, S. 76]. Auch bei der Analyse des Restrukturierungsbedarfs bestehender Fabriken müssen nicht quantifizierbare Einflüsse auf die Fabrikstruktur messbar gemacht werden [Lübke mann et al. 2016, S. 256], etwa durch die Einteilung qualitativer Einflüsse auf eine Ordinalskala [Lübke mann und Nyhuis 2016, S. 9]. Hierbei besteht ebenfalls das Problem, die verschiedenen Einflüsse zu identifizieren und durch die Quantifizierung messbar zu machen. Durch die komplexen Wechselbeziehungen der Strukturelemente ist zudem die Unabhängigkeit der Kriterien nur schwerlich zu gewährleisten.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Bewertung von Fabrikstrukturen eine anspruchsvolle Aufgabe ist. Sie kann zwar durch Bewertungsmethoden wie der Nutzwertanalyse nachvollziehbar gemacht werden, ist jedoch bei vielen Kriterien stark subjektiv geprägt. Meistens erfolgt die Bewertung zudem durch die Planer selbst, so dass eine zusätzliche Verzerrung nicht auszuschließen ist. Trotz digitaler Unterstützung wird die Fabrikplanung daher nicht zu einem Algorithmus, der ein eindeutiges Rechenergebnis liefert [Nyhuis und Bischoff 2017, S. 28]. Die planerische Erfahrung ist nach wie vor der wichtigste Faktor in der Bewertung und Auswahl von Layoutalternativen.

3.3 Ableitung von Anforderungen an das neu zu entwickelnde Layoutwerkzeug

In diesem Kapitel werden Anforderungen an ein neu zu entwickelndes Layoutwerkzeug abgeleitet. Diese dienen der prototypischen Realisierung in Kapitel 1 sowie der in Kapitel 5 vorgenommenen Bewertung.

Die Anforderungen sind in vier Felder unterteilt, welche sich an den Eigenschaften der Definition der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung orientieren. Die Felder umfassen generelle Anforderungen an ein Werkzeug zur Layoutplanung, spezifische Forderungen der Fabriklayoutplanung in der frühen Phase, die digitale Durchgängigkeit und die Intuitivität. Sie werden im Folgenden beschrieben.

3.3.1 Generelle Anforderungen der Layoutplanung

Grundsätzlich muss ein Werkzeug zur Layoutplanung die Möglichkeit bieten, verschiedene Flächentypen zu erzeugen, zu verändern und zu verschieben, so wie es der Ablauf der Layoutplanung erfordert (vgl. Kapitel 2.2.3). Dazu gehört eine lückenlose, durchgängige Dokumentation der Ergebnisse, die die spätere Nachvollziehbarkeit der Planung und Entscheidungen sicherstellt.

Zur Planung zukunftsrobuster Werke (vgl. Kapitel 2.2.1) ist es notwendig, dass die Variantenplanung unterstützt wird. Dies bedeutet, dass Ergebnisse in Varianten gespeichert und wieder aufgerufen werden können. Außerdem müssen Elemente verschiedener Varianten wieder- und weiterverwendbar sein.

Das zu entwickelnde Layoutwerkzeug muss die generellen Anforderungen an eine Software zur Layoutplanung erfüllen. Dazu gehören der entsprechende Funktionsumfang hinsichtlich der Erstellung und Manipulation von Layouts, die Dokumentation und die Unterstützung der Variantenplanung.

3.3.2 Spezifische Anforderungen der frühen Fabriklayoutplanung

Ergänzend zu den allgemeinen Ansprüchen an ein Werkzeug zur Layoutplanung müssen für die Fabriklayoutplanung in der frühen Phase weitere, spezielle Anforderungen erfüllt werden (vgl. Kapitel 2.2.4), damit die Planungstätigkeit effizient erfolgen kann.

Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 2.2.4 muss die freie Gestaltung des Layouts und die Nutzung von existierenden Teillösungen, sowohl hinsichtlich der Bereichsflächen als auch größerer zusammenhängender Bereiche, möglich sein.

Da die Fabriklayoutplanung in der frühen Phase eine sehr kreative Tätigkeit ist, bei welcher zudem nur grobe Informationen vorliegen (vgl. Kapitel 2.2.4), muss ein Werkzeug in dieser Phase hohe Freiheitsgrade bei der Planung ermöglichen. Die Anordnung ist soweit zu unterstützen, dass es dem Planer möglich ist zu erkennen, ob die Flächen überschneidungsfrei platziert sind (Kollisionskontrolle) und eine Bewertung der Layouts möglich wird.

Die Anordnung von Flächen und Bereichen muss in einem Raster erfolgen können, das in seinen Abmessungen frei wählbar ist. Zusätzlich muss eine Zuweisung von Flächen zu bestimmten Klassen möglich sein, damit eine Flächenanalyse durchführbar ist. Die Ergebnisse sollten unmittelbar so vorliegen, dass eine Nutzwertanalyse und auch eine frühe Kostenschätzung nach der Einzel-Wert-Methode möglich sind (vgl. Kapitel 3.2.1.3).

Die besonderen Anforderungen der frühen Phase der Fabriklayoutplanung hat das Layoutwerkzeug zu erfüllen. Dazu gehören die verschiedenen Kriterien zur Bewertung, die Planung im Raster, die Flächenauswertung und die Vorbereitung einer frühen Kostenschätzung.

3.3.3 Digitale Durchgängigkeit

Zur Gewährleistung der digitalen Durchgängigkeit, wie sie in Kapitel 2.3.2 beschrieben wurde, ist es notwendig, die syntaktische Interoperabilität des

Werkzeugs bei der Zusammenarbeit mit der Systemumwelt sicher zu stellen. Dies betrifft die Bereiche Datenerzeugung, -darstellung und -speicherung. Grundlage der nachfolgenden Ausführungen ist, dass die allgemeinen Anforderungen an das Datenmanagement, wie Konsistenz, Sicherung oder Archivierung [vgl. Bracht et al. 2018, S. 177-179], erfüllt sind.

Wichtigstes Ziel ist es hier, die Kompatibilität der Daten mit der Systemumwelt des zu entwickelnden Planungswerkzeugs sicherzustellen. Darunter ist sowohl die Lesbarkeit der Daten als auch die Konformität der Datenstruktur hinsichtlich entsprechender Richtlinien zu verstehen, da das korrekte Funktionieren weiterer Anwendungen auf die vollständige Einhaltung dieser Standards angewiesen ist.

Die technische Lesbarkeit der Daten wird über die Festlegung auf ein bestimmtes Dateiformat sichergestellt. Hierzu stehen generell sowohl proprietäre herstellerspezifische Formate, z.B. *.dgn (Bentley) oder *.dwg (Autodesk), als auch neutrale Datenaustauschformate zur Verfügung, bei denen jedoch durch die Konvertierung ggf. Datenverluste in Kauf genommen werden müssen [Bracht et al. 2018, S. 200].

Typische Austauschformate, wie *.step oder *.iges, die für den Austausch von Produktdaten entwickelt wurden, werden den Anforderungen der Fabriklayoutplanung in der Regel nicht gerecht. Eine Alternative stellt das *.jt Format dar, welches für den Datenaustausch zwischen der Layoutplanung und der Anlagen- und Produktplanung genutzt wird [VDA 2009, S. 9]. Diese Daten werden jedoch nur zur Darstellung eingebunden und nicht weiterbearbeitet, da zwar die äußere Gestalt identisch ist und verschiedene Metadaten übernommen werden können, ein Informationsverlust gegenüber den Originaldaten aber nicht ausgeschlossen ist. Weil die Datenintegrität in der Automobilindustrie höchste Priorität hat, ist der Datenaustausch in der Regel in dem nativen Format des eingesetzten Fabrikplanungssystems durchgeführt [VDA 2009, S. 8].

Um im Unternehmen die einwandfreie Verwendbarkeit der Daten sicherzustellen, ist die Erzeugung, Speicherung und Übertragung von Layouts in der Automobilindustrie häufig sehr detailliert geregelt [VDA-Empfehlung 4960]. Neben

der Verwendung des festgelegten Dateiformats ist die Aufteilung von Layern (Ebenen), die Farbgebung, die Benennung von Elementen usw. in Ausführungsrichtlinien fixiert. Je nach OEM können sich die Anforderungen an den Aufbau der CAD-Dateien inhaltlich unterscheiden, sind aber in den Grundzügen vergleichbar. Beispiele für die umfangreichen Regelwerke sind etwa die HLS Konzernausführungsrichtlinien von Volkswagen [Röhl und König 2014, S. 23] oder der FAPLIS CAD-Leitfaden von Daimler [Daimler AG 2018a].

Durch die Festlegung von Datenformat und Ausführungsrichtlinien wird die Weiter- und Wiederverwendung der Daten im Planungsprozess sichergestellt und die ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung (vgl. Kapitel 3.1.3) der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung realisiert. Als Anforderung an das Werkzeug gilt daher:

Zur Gewährleistung der digitalen Durchgängigkeit muss das Layoutwerkzeug in die ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung eines Fabrikplanungssystems integrierbar sein. Zusätzlich muss sichergestellt sein, dass es möglich ist, Layouts entsprechend der durch die jeweiligen Ausführungsbestimmungen vorgegebenen Datenstruktur zu erzeugen.

3.3.4 Intuitivität

Die Intuitivität eines Werkzeugs gewährleistet die Zugänglichkeit des Werkzeugs für eine große Anzahl an Planern, ohne dass diese eine vorherige Schulung benötigen. Das Layoutwerkzeug muss daher so gestaltet sein, dass es im Sinne der „Einfachheit der Bedienung“ (vgl. Kapitel 3.1.1) selbsterklärend, übersichtlich und benutzerfreundlich ist. Eine Anforderung an das zu entwickelnde Werkzeug ist die Eignung zur intuitiven Planung, um somit in der Planung die Konzentration auf die Entfaltung der Fachkompetenz zu ermöglichen. Weiterhin muss die Benutzung spontan, d.h. ohne langwierige Vor- und Nachbereitung möglich sein (vgl. Kapitel 3.1.2), was durch Ressourcen- und Datenverfügbarkeit realisiert wird. Die

Wiederverwendung eigener Elemente muss in Form eines speicher- und anpassbaren Modulbaukastens gegeben sein.

Sie Intuitivität eines Layoutwerkzeugs stellt sicher, dass hierarchisch und fachlich unterschiedlicher Wissensträger in unmittelbar im Planungsprozess mitwirken können. Insgesamt soll so die Kollaboration unterschiedlicher Disziplinen verbessert werden. In der Folge steigt durch die Nutzung impliziten Wissens die Planungsqualität bei gleichzeitiger Verringerung der Planungszeit (vgl. Kapitel 2.4.3)

Um die frühzeitige Einbeziehung fachlich und hierarchisch unterschiedlicher Planer zu realisieren, muss sich das Layoutwerkzeug durch Intuitivität auszeichnen. Diese zeigt sich durch die Zugänglichkeit des Werkzeugs und die unbewusste Nutzung von Vorwissen durch eine Komplexitätsreduzierung der Bedienung. Die Nutzung des Layoutwerkzeugs ist dadurch ohne eine vorherige Schulung möglich.

4 Prototypische Realisierung des Layoutwerkzeugs PTLAYOUT

Auf Grundlage der zuvor erfolgten Konzeption der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung erfolgt in diesem Kapitel die prototypische Realisierung des Layoutwerkzeugs. Dieses wird nachfolgend als „PTLayout“ (Planungstisch-Layout) bezeichnet. Zunächst wird aus den in Kapitel 3.2 erarbeiteten Anforderungen ein Umsetzungskatalog einzelner Funktionen aufgestellt (Kapitel 4.1). Anschließend wird die durch den Autor vorgenommene Realisierung dargestellt (Kapitel 4.2).

4.1 Umsetzungskatalog

Die in Kapitel 3.2 abgeleiteten Anforderungen an das Layoutwerkzeug werden in diesem Kapitel in einen Umsetzungskatalog mit konkreten Funktionen und Eigenschaften überführt. Diese lassen sich in folgende Kategorien eingliedern, welche im Folgenden einzeln beschrieben werden:

- Layoutmanipulation
- Objektbibliothek
- Kollisionsprüfung
- Flächenauswertung
- Datenmanagement
- Dokumentation
- Benutzeroberfläche

4.1.1 Layoutmanipulation

Die Grundfunktion eines jeden Layoutwerkzeugs stellt die Layoutmanipulation, also die Erstellung und Veränderung des Layouts und seiner Elemente, dar. Im Vordergrund steht hierbei, die Kreativität des Nutzers zu unterstützen, indem er alle Ideen umsetzen kann und gleichzeitig den Anwender bei der Layouterstellung, etwa durch die Ausrichtung der Elemente im Raster, zu unterstützen.

Dies umfasst sowohl die freie Gestaltung und Positionierung einzelner Elemente als auch die Unterstützung bei der Erstellung von häufig wiederkehrenden Formen

wie Rechtecken und der Ausrichtung dieser Elemente. Die sich ergebenden Funktionen zur Layoutmanipulation sind in **Tabelle 4-1** dargestellt.

Tabelle 4-1: Übersicht der Funktionen zur Layoutmanipulation

Kategorie	Funktion
Erstellen	Rechteck erstellen
	Kreis erstellen
	Striche erstellen
	Fahrstraßen erstellen
	Kopieren
	Löschen
	Farbwahl
	Beschriftung
	Raster
	Flächenetiketten
Ausrichten	Auf Stoß ausrichten
	Ausrichten am Raster
	Präzisionsausrichten
Manipulation	Verschieben
	Auswahl / Mehrfachauswahl
	Freies Drehen
	90° Drehen
	Skalieren
	Spiegeln
	Element sperren
	Gruppieren

4.1.2 Objektbibliothek

Eine Objektbibliothek fasst bereits erstellte und zur Wiederverwendung abgespeicherte Elemente zusammen, so dass sie in der Planung unkompliziert abgerufen und platziert werden können.

Im Sinne der Digitalen Fabrik stellt eine solche Bibliothek Best-Practice-Lösungen bereit und ermöglicht die Weiterverwendung von Teilergebnissen aus abgeschlossenen Projekten [Petzelt et al. 2010, S. 132]. Häufig verwendete Elemente können direkt in das Layout eingefügt werden, ohne erneut gezeichnet

werden zu müssen, was auch die Variantenplanung sinnvoll unterstützt. Die Bibliothek muss einerseits vordefinierte Elemente enthalten als auch die Fähigkeit besitzen, durch den Nutzer während der Planung mit weiteren, selbst definierten Elementen ergänzt werden zu können. **Tabelle 4-2** führt die dafür notwendigen Funktionen auf.

Tabelle 4-2: Übersicht der Funktionen der Bausteinbibliothek

Funktion	Kurzbeschreibung
Element hinzufügen	Ausgewähltes Element zur Bausteinbibliothek hinzufügen
Element löschen	Element aus der Bausteinbibliothek löschen
Element in Layout suchen	Suchfunktion, ermöglicht die Suche nach Elementen nach Namen

Da für die Planung ein existierendes 3D-CAD-System erweitert werden soll (vgl. Kapitel 4.1.5), kann zusätzlich zur Objektbibliothek die Möglichkeit genutzt werden, andere Layoutdateien zu referenzieren (lat. *referre*, sich auf etwas beziehen), d.h. ein Abbild dieser Daten in einer anderen Layoutdatei zu verwenden. Über diese Funktion können auch komplexe 3D-Elemente, wie Gebäude oder ganze Bauabschnitte, für Varianten oder neue Planungen verwendet werden. Gerade im Zuge der im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit vorgeschlagenen Standardisierung von Elementen (vgl. Kapitel 3.2.1.3) ist diese Funktion von großem Nutzen. Des Weiteren wird durch das 3D-CAD-Modell eine frühzeitige digitale Absicherung mit den Werkzeugen der Digitalen Fabrik möglich (vgl. Kapitel 2.3.1, S. 37).

4.1.3 Kollisionsprüfung

Abgeleitet aus den spezifischen Anforderungen (vgl. Kapitel 3.3.2) ist in das Werkzeug eine Kollisionskontrolle zu implementieren. Als Kollisionen gelten bei der Fabriklayoutplanung Überschneidungen von platzierten Elementen. Diese sollen durch eine systemseitige Prüfung erkannt und visuell kenntlich gemacht werden, so dass der Nutzer darauf reagieren kann. Die Kennzeichnung soll dabei den Grundsätzen der Informationsdarstellung nach DIN EN ISO 9241-112 entsprechen. Zusätzlich zu einer farblichen Markierung soll die Anzahl der gefundenen Kollisionen ausgegeben werden. Der Nutzer erhält durch diese Informationen einen schnellen

Überblick und kann die Optimierung des Layouts vornehmen. **Tabelle 4-3** listet die dafür notwendigen Funktionen auf.

Tabelle 4-3: Übersicht der Funktionen der Kollisionskontrolle

Funktion	Kurzbeschreibung
Kollisionen prüfen	Layoutelemente werden auf Überschneidungen überprüft
Visuelle Markierung von Kollisionen	Elemente mit gefundenen Kollisionen werden farblich hervorgehoben
Ausgabe der Kollisionsanzahl	Anzahl der gefundenen Kollisionen werden ausgegeben

4.1.4 Flächenauswertung

Um schon während der Planung wesentliche Kennzahlen zum Layout aufnehmen und nutzen zu können, ist es notwendig, eine automatisierte Flächenauswertung in das Layoutwerkzeug zu integrieren. Diese soll entsprechend der Analyse und Planung von Betriebsflächen nach VDI 3644 aufgebaut sein. Das in der Richtlinie vorgestellte systematische Flächenplanungssystem (SFPS) unterscheidet spezifische Teilflächen für verschiedene Bereiche und ist derart gestaltet, dass die sich ergebende Datenstruktur einen unmittelbaren Einsatz in der Datenverarbeitung gestattet [VDI 3644, S. 7]. **Abbildung 4-1** zeigt die Gliederung der Flächen im systematischen Flächenplanungssystem.

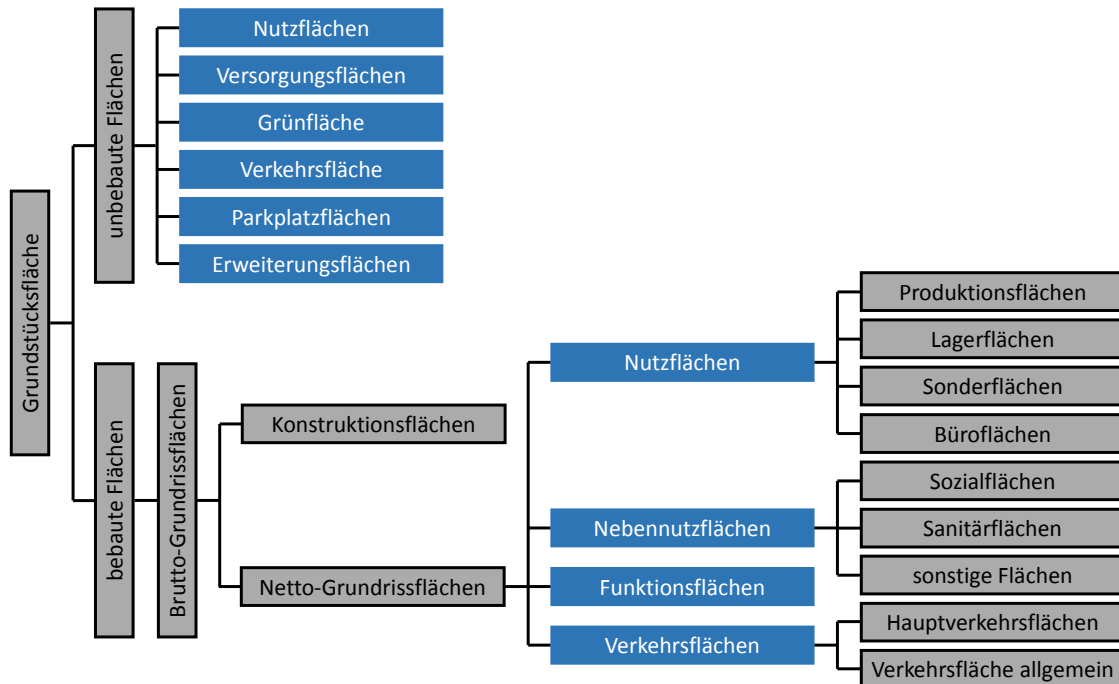


Abbildung 4-1: Systematisches Flächenplanungssystem (SFPS) mit den für die Fabriklayoutplanung relevanten Flächentypen (blau) [in Anlehnung an VDI 3644, S. 7]

Das systematische Flächenplanungssystem gliedert die Grundstücksfläche zunächst in bebaute und unbebaute Flächen⁶, welche dann nach betrieblicher Verwendung weiter unterteilt werden. In blauer Farbe hervorgehoben sind in der Abbildung die Flächentypen, die den für die Fabriklayoutplanung relevanten Planungsebenen (vgl. Kapitel 2.2.2) entsprechen und somit bei der Flächenauswertung im Layoutwerkzeug zur Verfügung stehen müssen. Die Summen der einzelnen Flächen sollen als Auswertung im Layoutwerkzeug verfügbar sein. Ebenso ist für die Weiterverarbeitung der Daten außerhalb der Layoutplanung eine Exportfunktion vorzusehen, welche die Flächennutzung in einem möglichst vielseitig verwendbaren Dateiformat wie etwa *.csv abspeichert. Für die Übersichtlichkeit der erzeugten Layouts ist es zudem notwendig, die Farbgebung der Flächen und deren Beschriftungen anpassen zu können. **Tabelle 4-4** gibt einen Überblick der zur Flächenauswertung notwendigen Funktionen.

⁶ Bebaute Fläche: „Teil der Grundstücksfläche, die durch ein Bauwerk oberhalb der Geländeoberfläche überbaut oder überdeckt oder unterhalb der Geländeoberfläche unterbaut ist“, unbebaute Fläche: vice versa [DIN 277-1, S. 5]

Tabelle 4-4: Übersicht der Funktionen der Flächenauswertung

Funktion	Kurzbeschreibung
Flächentyp einstellen	Zuweisung der Flächentypen nach VDI 3644
Einstellung zur Farbdarstellung	Möglichkeit der Anpassung der Farbdarstellung
Auswertungsfunktion	Anzeige der Größen pro Flächentyp
Export der Ergebnisse	Ausgabe einer *.csv Datei mit Flächengrößen

4.1.5 Datenmanagement

Entsprechend der Forderung nach digitaler Durchgängigkeit im Planungsprozess (vgl. Kapitel 3.3.3), muss das Layoutwerkzeug in die ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung des Fabrikplanungssystems eines Automobilherstellers eingebunden werden können. Die digitale Durchgängigkeit wird dabei mittels der syntaktischen Interoperabilität sichergestellt. Diese lässt sich durch eine gemeinsame Datenbasis mit einem standardisierten Datenformat oder eingeschränkt durch Konvertierung erreichen (vgl. Kapitel 2.3.2).

Der große Vorteil der in der Automobilindustrie eingesetzten Fabrikplanungssysteme ist die gemeinsame Datenhaltung, welche viele Anwendungen innerhalb eines Hauptsystems zusammenführt (vgl. Kapitel 2.5.1.2). Da zudem nach den Empfehlungen des VDA der Datenaustausch der Layoutplanung mit dem nativen Datenformat des eingesetzten Fabrikplanungssystems durchgeführt werden soll (vgl. Kapitel 3.3.3), ist eine direkte Einbindung des Layoutwerkzeugs in die CAD-Systemwelt des Automobilherstellers anzustreben. Somit ist des Weiteren sichergestellt, dass die Anforderungen der Automobilhersteller an die CAD-Daten hinsichtlich Layerklassifizierung, Farbgebung und weiteren Details [Wiendahl et al. 2014, S. 590] eingehalten werden können und in der Folge der innere Aufbau der Layoutdateien den Ausführungsrichtlinien entspricht.

Für die Umsetzung des Layoutwerkzeugs und Integration in ein Fabrikplanungssystem stehen verschiedene Ansätze zur Wahl, welche sich durch die Eigenständigkeit des Werkzeugs und in der Regel der digitalen Durchgängigkeit unterscheiden. **Tabelle 4-5** stellt verschiedene Möglichkeiten zur Umsetzung dar.

Tabelle 4-5: Übersicht der Möglichkeiten der Integration des Layoutwerkzeugs in ein Fabrikplanungssystem [in Anlehnung an Claus und Schwill 2006, S. 511]

Art	Funktionsumfang	Digitale Durchgängigkeit	Aufwand
Stand-Alone	Sehr hoch: Frei komplett frei gestaltbar, eigenständiges Programm	Niedrig: Interoperabilität mit Fabrikplanungssystem aufwendig, gemeinsame Datenbasis aufgrund proprietärer Dateiformate nicht zu realisieren, Konvertierungen nicht zu vermeiden	Sehr groß: Alle Funktionen und eine vollständige Benutzeroberfläche müssen von Grund auf entwickelt werden, Gefahr der nicht vollständigen Kompatibilität
Plug-In	Hoch: Erweiterung des Grundprogramms um umfangreiche neue Funktionalitäten durch vorgesehene Schnittstelle	Hoch: Durch gemeinsame Nutzung der Programmbestandteile gegeben, erweiterter Funktionsumfang kann Abweichungen von der Datenkonformität bedeuten	Mittel: Grundfunktionen des Fabrikplanungssystems werden gemeinsam genutzt, Oberfläche und weitere Funktionen müssen entwickelt werden
Add-On	Hoch: Anpassung des Grundprogramms durch programminterne Erweiterungsmöglichkeiten, z.B. Makroprogrammierung	Sehr hoch: Durch gemeinsame Nutzung der Programmbestandteile gegeben, Datenkonformität i.d.R. sichergestellt	Geringer: Bereits vorhandene Funktionen und Oberflächen können genutzt und ggf. angepasst oder erweitert werden

Vom „Stand-Alone“-Programm bis zum „Add-On“ nimmt die Freiheit bei der Programmgestaltung und die Eigenständigkeit der Software ab. Dies bedeutet oftmals auch, dass entweder offene, herstellerunabhängige Dateiformate zum Einsatz kommen oder, dass Schnittstellen durch programmeigene Konverter bereitgestellt werden müssen, welche jedoch die Kompatibilität zu einer ganzheitlichen Daten- und Planungsumgebung nicht immer vollständig herstellen.

Durch die Erweiterung eines Programms, welches bereits in eine ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung eingebunden ist, wird sichergestellt, dass die digitale Durchgängigkeit und das Datenmanagement gewährleistet werden. Zudem reduziert sich der Entwicklungsaufwand, da Funktionsteile des Programms genutzt werden können und Grundfunktionen nicht erneut zu entwickeln sind. Jedoch wird durch das zu Grunde liegende Programm der Rahmen der technischen Möglichkeiten vorgegeben, so dass ggf. Kompromisse bei der Programmierung eingegangen werden müssen. Ein „Stand-Alone“-Programm bietet bei der Entwicklung größere Freiheiten, kann jedoch die Ansprüche an die Durchgängigkeit

eventuell nicht erfüllen, da etwa proprietäre Datenformate nicht genutzt werden können und der Nutzer auf die Konvertierungen angewiesen ist. Neben der unzureichenden Kompatibilität führt auch der erhöhte Nutzungsaufwand durch die Konvertierungen zur Isolation des Werkzeugs, was jedoch als das größte Hemmnis zu seiner Verbreitung angesehen wird (vgl. Kapitel 2.3.2). Aus diesem Grund soll das Layoutwerkzeug durch Erweiterung eines bestehenden CAD-Werkzeugs realisiert und in ein Fabrikplanungssystem eingebunden werden.

Da die Ergebnisse der frühen Planungsphase die Grundlage für die Bauwerksplanung bilden, ist zusätzlich eine Exportfunktion nach dem IFC-Standard⁷ anzustreben. Somit kann die intuitive digitale Fabriklayoutplanung als eine Grundlage für die Bauwerksinformationsmodellierung nach der BIM-Methodik⁸ dienen. Die grundsätzlichen Informationen, die mit der Konzeptplanung vorliegen, fließen in das BIM-Grundlagenmodell ein, welches Grundlage der Georeferenzen weiterer Fachmodelle ist [VDI 2552 Blatt 4, S. 8]. Sollten im Layout bereits 3D-Daten platziert sein (vgl. Kapitel 4.1.2), können diese ebenso der Bauwerksplanung zur Verfügung gestellt werden. Erste Ansätze versuchen bereits den Fabrikplanungsprozess und die BIM-Methodik zu verbinden [Burggräf et al. 2019], was durch die intuitive digitale Fabriklayoutplanung somit von Beginn an unterstützt wird.

4.1.6 Dokumentation

Die durchgängige Dokumentation der Planung ist eine wesentliche Voraussetzung einer hohen Planungsqualität und leitet sich aus den generellen Anforderungen der Layoutplanung ab (vgl. Kapitel 3.3.1). Ebenso wird die Dokumentation zur sinnvollen Durchführung der Szenarioplanung benötigt (vgl. Kapitel 2.2.1), um die erzeugten Varianten miteinander vergleichen zu können.

⁷ Industry Foundation Classes: Standard für den Datenaustausch in der Bauindustrie. Beschrieben in der Norm DIN EN ISO 16739

⁸ „Building Information Modeling (BIM) bezeichnet eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden“ [VDI/BS 2552 Blatt 8.1, S. 2]

Dazu ist es notwendig, dass Varianten und Versionen entsprechend des Datenmanagements (vgl. Kapitel 4.1.5) schnell und einfach angelegt und abgespeichert werden können. Zusätzlich sollen Screenshots direkt aus dem Programm heraus möglich sein, um für Präsentationen und Diskussionen entsprechendes Bildmaterial unmittelbar zur Verfügung zu haben. **Tabelle 4-6** fasst die Funktionen zur Dokumentation zusammen.

Tabelle 4-6: Übersicht der Funktionen zur Dokumentation

Funktion	Kurzbeschreibung
Abspeichern von Varianten	Schnelles Abspeichern einer neuen Variante
Screenshot	Abspeichern eines Screenshots zur schnellen Überführung in Präsentationen o.ä.

4.1.7 Benutzeroberfläche

Wesentliches Merkmal des Layoutwerkzeugs ist neben den umzusetzenden Funktionen die intuitive Benutzeroberfläche. Diese gewährleistet durch ihre Gestaltung die Zugänglichkeit des Werkzeugs [vgl. DIN EN ISO 9241-171] und nutzt unbewusstes Vorwissen der Anwender bezüglich Eingabetechnologie sowie Art und Weise der Benutzerführung (vgl. Kapitel 2.4.1).

Aus diesem Grund wird die Benutzeroberfläche für die Bedienung über ein Touch-Display ausgelegt. Die Interaktion über ein solches Display hat sich im Umgang mit IT-Produkten im industriellen und privaten Umfeld längst etabliert und ist für viele Menschen längst eine Selbstverständlichkeit [Machate et al. 2013, S. 14]. Hierbei ist darauf zu achten, dass Schaltflächen und weitere Bedienungselemente u.a. großzügig gestaltet sind, so dass eine Bedienung mit dem Finger möglich ist.⁹

⁹ Siehe bspw. „Fat-Finger-Problem“: Der Finger ist deutlich größer als viele Ziele, die auf einem Touch-Display anvisiert werden. Aufgrund der systemseitigen Ermittlung des Kontaktpunktes kann es dabei dazu kommen, dass Ziele verfehlt werden, obwohl der Nutzer diese korrekt anvisiert hat. Je größer das Display ist, desto größer wird dieser Fehler, da die Nutzer ihren Finger mit dem gesamten Körper positionieren und mit der Hand das Ziel teilweise verdecken [Borchers et al. 2013, S. 371-372]. Zudem liegen Displays ab einer bestimmten Größe oft flach vor dem Nutzer auf einem Tisch, so dass durch den flacheren Blickwinkel zusätzlich ein Parallaxenfehler aufgrund des Abstands zwischen Displayoberfläche („Schutzglas“) und Kontaktsystem des Displays vorliegt.

Die grafische Benutzeroberfläche orientiert sich dabei an grundsätzlichen Piktogrammen verschiedener Programme sowie allgemein bekannten Symbolen wie Mauszeiger u.ä. und folgt somit den Vorgaben zur visuellen Informationsdarstellung der DIN EN ISO 9241-112 bzw. DIN EN ISO 9241-125 sowie den Rahmenbedingungen und Richtlinien der Icons für Benutzerschnittstellen nach ISO/IEC 11581-10. Ferner sind die Schaltflächen und Einstellungsmöglichkeiten auf die wesentlichen Funktionen der Kapitel 4.1.1 bis 4.1.6 reduziert. Durch die Piktogramme ergibt sich ein Wiedererkennungswert auch für Anwender, die zuvor noch kein Fabrikplanungssystem benutzt haben. Für Fälle, in denen Piktogramme nicht eindeutig sind, wurde wegen der Erkennbarkeit auf die Beschriftung der Schaltflächen ausgewichen. Die weitere Ausgestaltung erfolgt nach den Empfehlungen zur visuellen Informationsdarstellung [DIN EN ISO 9241-125].

4.2 Programmierung

In diesen Kapitel erfolgt die Realisierung des in Kapitel 4.1 aufgenommenen Umsetzungskatalogs. Diese verschiedenen Funktionen des Layoutwerkzeugs sollen zur Erfüllung der Forderung einer ganzheitlichen Daten- und Planungsumgebung in einem Fabrikplanungssystem umgesetzt werden. Wie in Kapitel 2.5.1.2 dargestellt, nutzen die Automobilhersteller entweder ein Softwarepaket der Firma Autodesk oder der Firma Bentley Systems. Tabelle 4-7 stellt die Eigenschaften der beiden Systemwelten gegenüber.

Tabelle 4-7: Vergleich der Fabrikplanungssysteme der deutschen Automobilhersteller

Eigenschaft	Autodesk	Bentley Systems
CAD-Programm	AutoCAD	MicroStation
Plandatenverwaltung	Vault	ProjectWise
Erweiterungsmöglichkeiten	AutoLISP, VBA	MDL, VBA
Automobilhersteller	Opel	Audi, BMW, Daimler, VW

Die Fabrikplanungssysteme zeichnen sich durch einen ähnlichen Aufbau aus. Dieser besteht aus einem CAD-Programm und einer Software zur Plandatenverwaltung. Die Systeme sind jeweils über eine programm-eigene Programmiersprache sowie durch die Skriptsprache VBA (Visual Basic for

Applications) erweiterbar. Von den deutschen Automobilherstellern nutzt nur Opel das Autodesk-System. Die anderen OEM nutzen die Softwareprodukte der Firma Bentley Systems und stimmen sich gemeinsam in der Arbeitsgruppe „Digitale Fabrikplanung“ des VDA über die Anforderungen und Weiterentwicklung ab. Dazu gehört auch die Zusammenarbeit mit der Firma Venturis IT, welche der Softwarelieferant von TRICAD MS ist. TRICAD MS ist die im VDA genutzte Programmerweiterung zur digitalen Fabrikplanung in der MicroStation, worüber auch Schnittstellen zu weiterer Fabrikplanungssoftware, wie etwa der Materialflusssimulation [Wurdig und Wacker 2008], bereitgestellt werden.

Grundsätzlich sind beide Fabrikplanungssysteme für die Entwicklung eines intuitiven und digitalen Layoutwerkzeugs geeignet. Aufgrund der größeren Verbreitung bei den deutschen Automobilherstellern und der Standardisierung durch den VDA wird jedoch die Bentley-Umgebung zur Umsetzung genutzt. Erste Untersuchungen der technischen Umsetzbarkeit einer für die Layoutplanung angepassten Benutzeroberfläche in dieser Softwarelandschaft wurden durch den Autor bereits zuvor durchgeführt [Schäfer 2015]. Die folgenden Kapitel beschreiben die Systemarchitektur, die Umsetzung und die Integration des Layoutwerkzeugs in das Systemumfeld eines Automobilherstellers, der die Bentley-Software einsetzt. Die Realisierung entspricht dabei der DIN EN ISO 9241-210.

4.2.1 Umsetzung der aufgenommenen Anforderungen

Grundlage der Umsetzung ist die MicroStation v8i SS4, der derzeit eingesetzten Version in der Automobilindustrie. Zur Erweiterung des Funktionsumfangs der MicroStation stehen die Programmiersprache MicroStation Development Language (MDL) oder die Skriptsprache Visual Basic for Applications (VBA) zur Verfügung (vgl. Tabelle 4-7). In MDL können umfangreiche Programmerweiterungen geschrieben werden (z.B. TRICAD MS). VBA dient der Erstellung von Makrobefehlen, welche zusammengefasste Folgen von Anweisungen sind, die über einen einzigen Aufruf ausgeführt werden können. Diese Makrobefehle nutzen Grundfunktionen des Programms und können parametrisiert werden, um flexibel eingesetzt werden zu können [Claus und Schwill 2006, S. 401]. Abgespeichert wird der VBA-Programmcode unabhängig von den Layoutdateien in *.mvba-Dateien.

Die Funktionen der MicroStation lassen sich auch über eine Befehlszeile per Tastatureingaben („keyin“) aufrufen. Diese Keyins können in der Makroprogrammierung genutzt werden, so dass alle Funktionen der MicroStation durch Makrobefehle automatisiert werden können.

Die grafische Benutzeroberfläche des Layoutwerkzeugs soll in der MicroStation über Bildschirmmenüs („Application Menus“) realisiert werden. Diese Bildschirmmenüs sind MicroStation-Dateien im *.dgn-Format, welche ab der MicroStation v8i SS3 als Werkzeugleiste geöffnet werden können. **Abbildung 4-2** zeigt ein Beispiel für ein solches Bildschirmmenü.

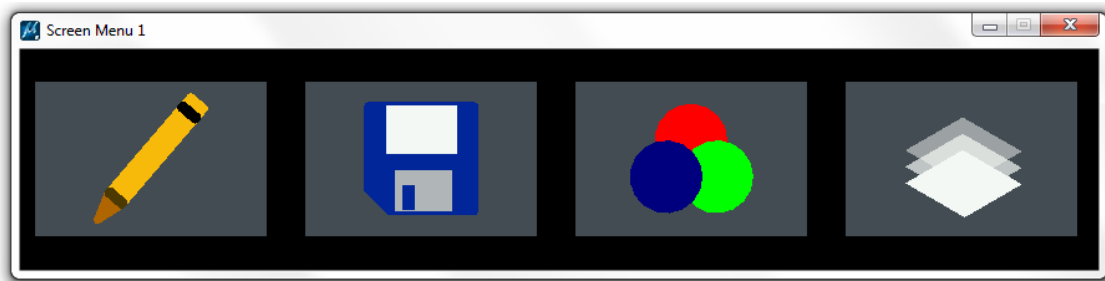


Abbildung 4-2: Neuentwickeltes Bildschirmmenu von PTLayout

Das hier gezeigte Bildschirmmenü umfasst vier Schaltflächen (Zeichentools, Dateioperationen, Funktionen und Ebenenverwaltung). Auf unterschiedlichen Ebenen („Layers“) können Beschriftungen, Piktogramme, Schaltflächen und Befehle hinterlegt werden. Durch Tastendruck werden dann die entsprechenden Makrobefehle aufgerufen. Aufgrund der freien Gestaltbarkeit der Schaltflächen sind diese im besonderen Maße geeignet, für die intuitive Touch-Bedienung angepasst zu werden. So können Schaltflächen entsprechend groß gestaltet werden und sind aufgrund der Piktogramme auch für programmfremde Anwender nutzbar.

Durch die umfangreichen Möglichkeiten der Steuerung durch Keyins können die vorhandenen MicroStation-Funktion für die Touch-Bedienung optimiert werden. Weitergehende Anpassungen oder die Programmierung nicht vorhandener Funktionen wird über entsprechende Makrobefehle realisiert. Beispielsweise weist dieser VBA-Programmcode zuvor mit der grafischen Benutzeroberfläche ausgewählten Elementen eine Ebene in der Layoutdatei zu:

```
Sub Ebene_zuweisen(LvL)

Dim ee As Enumerator
Dim oProp As PropertyHandler

Set ee = ActiveModelReference.GetSelectedElements

Do While ee.MoveNext

Set oProp = CreatePropertyHandler(ee.Current)
oProp.SelectByAccessString ("Level")
oProp.SetValue LvL

Loop

End Sub
```

Durch die VBA-Programmierung und die Bildschirmmenüs stehen somit alle notwendigen Funktionen zur Verfügung. Auch bei AutoCAD ist eine Programmerweiterung mittels VBA möglich. Daher wird die prototypische Realisierung des Layoutwerkzeugs zur intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung in der VBA-Skriptsprache in Verbindung mit einer grafischen Benutzeroberfläche aus Bildschirmmenüs umgesetzt, um eine eventuelle Übertragung zu ermöglichen. **Abbildung 4-3** zeigt die umgesetzten Funktionen im Layoutwerkzeug.

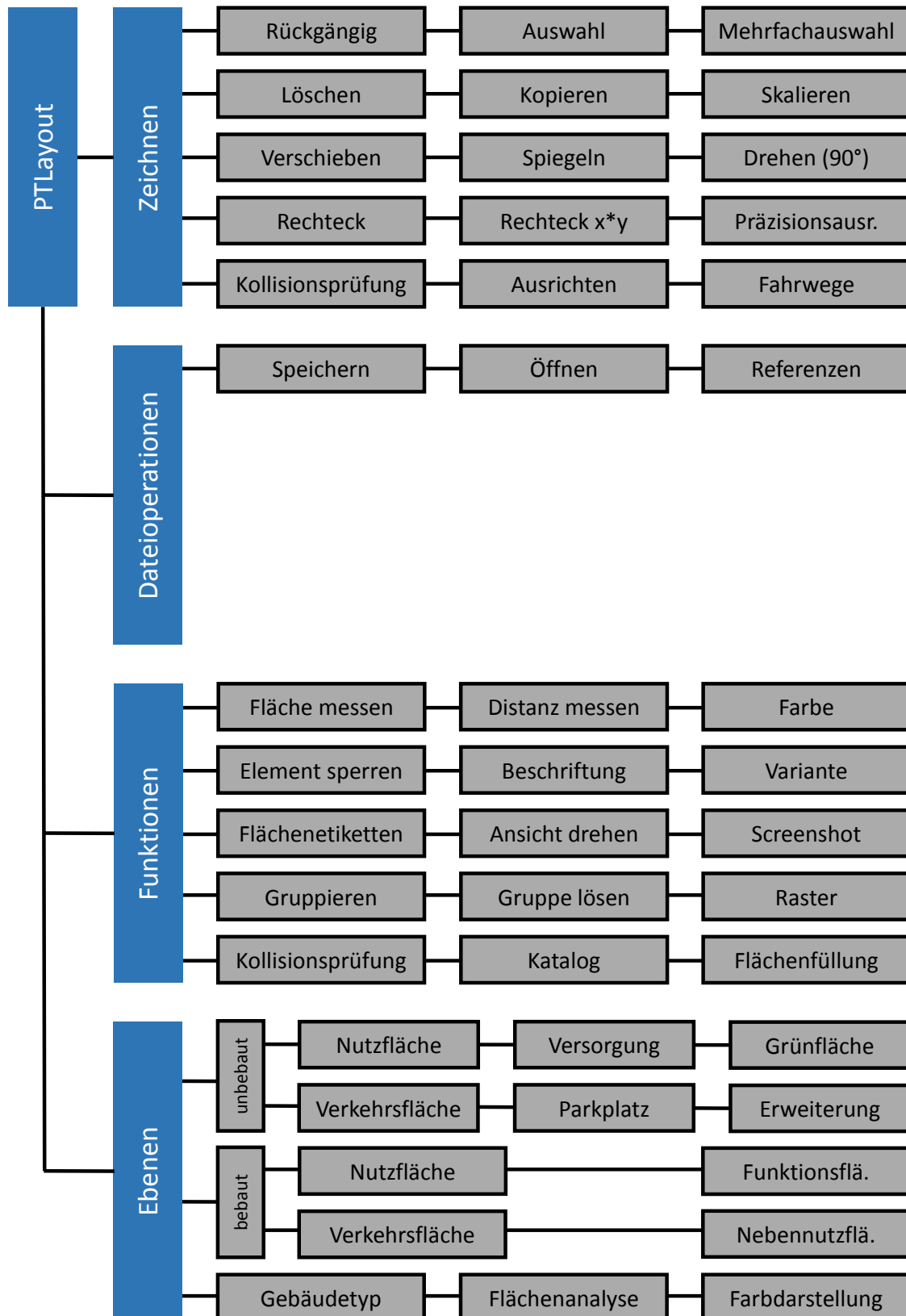


Abbildung 4-3: Übersicht der in PLayout eingebundenen Programmteile und neuentwickelten Funktionen

Die Funktionen wurden aufgrund des in Kapitel 4.1 beschriebenen Umsetzungskatalogs ausgewählt. Sie wurden aufgrund der besseren Übersichtlichkeit in vier Bildschirmmenüs aufgeteilt, welche über ein Hauptmenü aufgerufen werden. Im Rahmen der Pilotanwendung wurde das Layoutwerkzeug in die ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung eingeführt. **Abbildung 4-4** zeigt alle Bildschirmmenüs von PTLayout in der Übersicht.

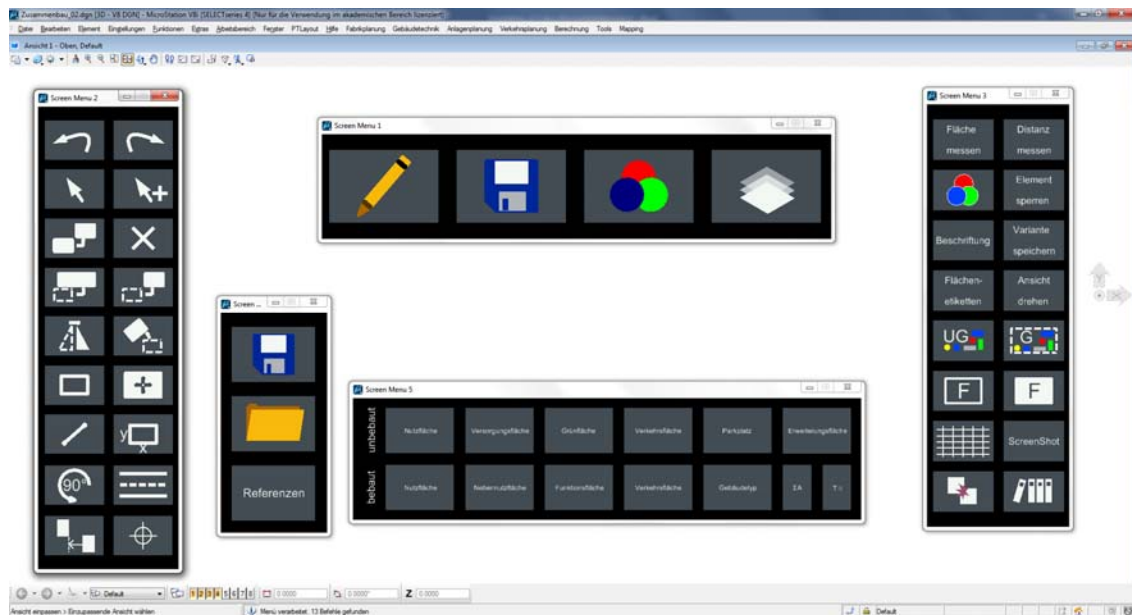


Abbildung 4-4: Alle Werkzeugeleisten von PTLayout in der Übersicht

Um die CAD-Dateien als Menüs öffnen zu können, müssen sie in Suchpfaden abgelegt werden, welche in der MicroStation durch Konfigurationsvariablen definiert sind. Diese Konfigurationsvariablen bilden den „Workspace“, welcher Dateipfade und weitere Einstellungen umfasst. Statt einer manuellen Anpassung können diese beim Programmstart mittels eines Skripts verändert werden. Der folgende Programmcode definiert eine neue Variable für einen Ordnerpfad und erweitert den Suchpfad für die Bildschirmmenüs:

```
#>>>>=====
# Define root path with PTLLayout project data
#-----
%if !defined(PTLayout_R00T)
PTLayout_R00T = D:\PTLayout
%endif
#<<<<=====

#>>>>=====
# Expand screen menu search path
#-----
MS_APPMEN > $(PTLayout_R00T)/_Menu/
#<<<<=====
```

Die Erweiterung des Suchpfads der Konfigurationsvariablen „MS_APPMEN“ wird in der MicroStation übernommen (**Abbildung 4-5**). Die Dateien können durch diese Vorgehensweise unabhängig von der restlichen Konfiguration der Software immer an der gleichen Stelle abgelegt werden.

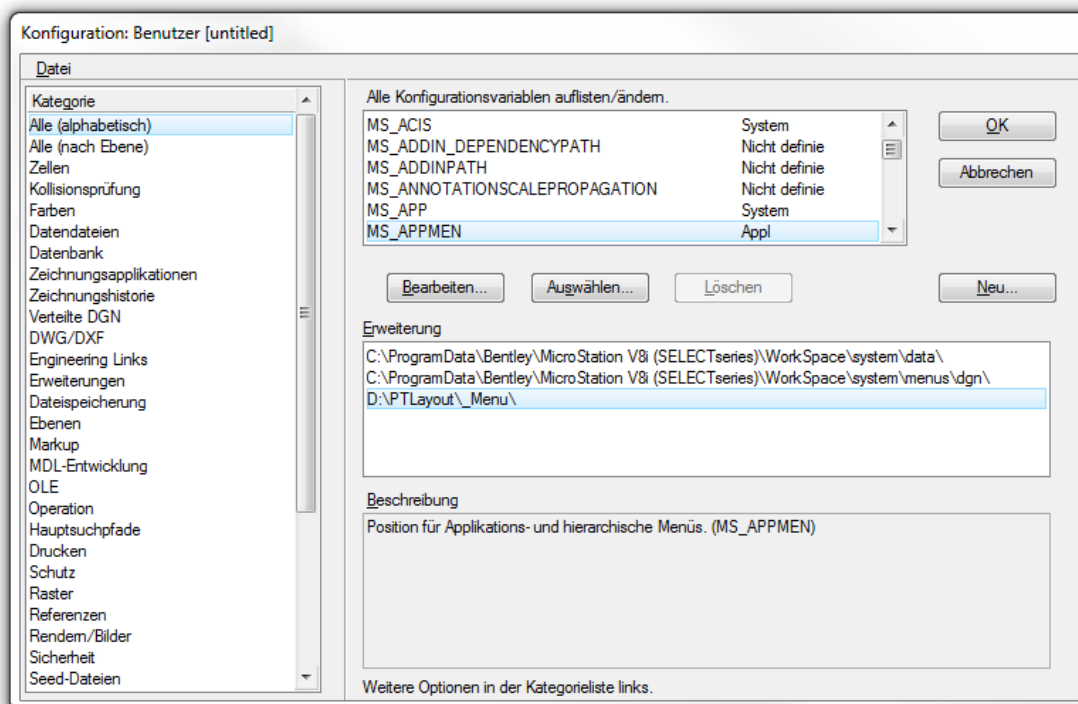


Abbildung 4-5: Erweiterung einer Konfigurationsvariablen

Über die Möglichkeit der Anpassung des Workspaces kann auch die Benutzeroberfläche der MicroStation erweitert werden. Dies wird dazu genutzt, das Layoutwerkzeug in die Oberfläche einzubinden und so für die Anwender schnell und einfach aufrufbar zu machen. Der Programmaufruf von PTLLayout erfolgt daher über einen eigens erstellten Eintrag in der Menüleiste (**Abbildung 4-6**).

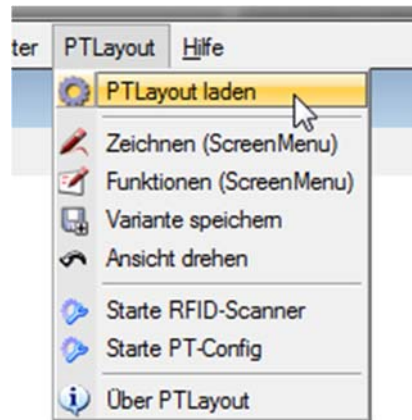


Abbildung 4-6: Menüeintrag PLayout

Die Konfiguration dieses Menüs wird über *.dgnlib Dateien vorgenommen, welche den Aufbau des Menüs und die Befehlszeilen speichern. Diese werden zusammen mit den *.mvba und den *.dgn Dateien abgelegt und über die MicroStation konfiguriert und per Skript eingelesen (**Abbildung 4-7**).

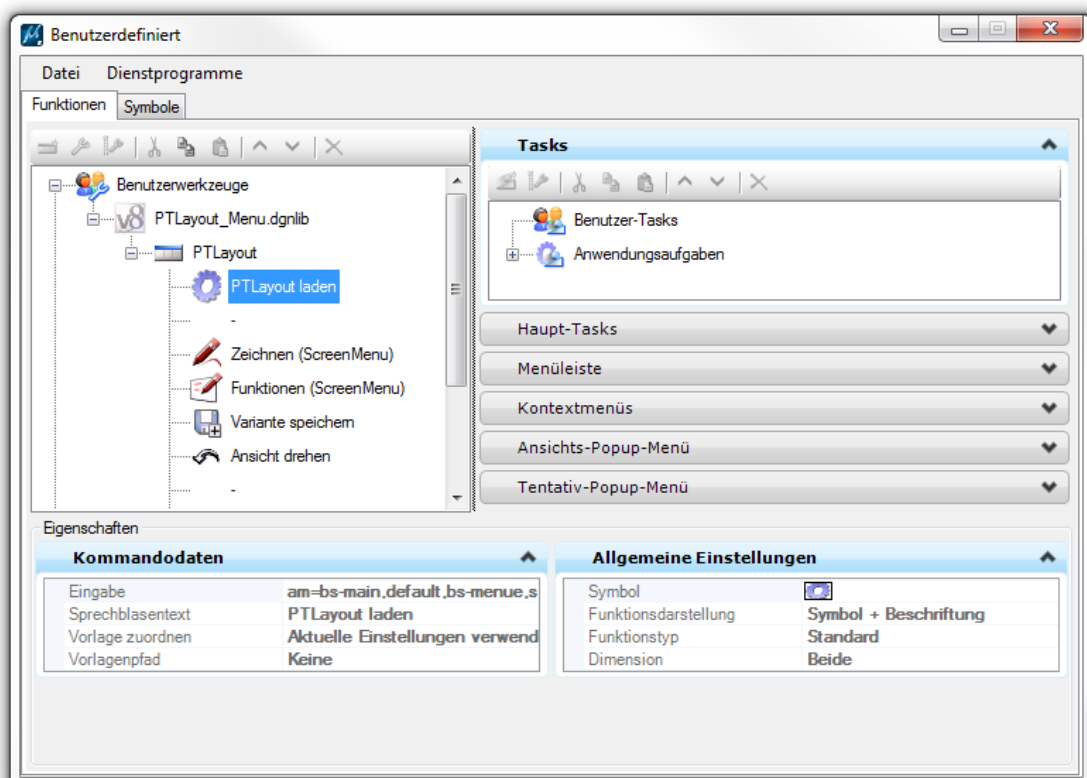


Abbildung 4-7: Konfiguration des Menüeintrags

4.2.2 Integration in das Systemumfeld eines Automobilherstellers

Um das Layoutwerkzeug in der ganzheitlichen Daten- und Planungsumgebung eines Automobilherstellers einsetzen zu können, ist es notwendig, es in die vorhandenen Systeme zu integrieren. In einem Fabrikplanungssystem wird die MicroStation nicht nur lokal auf einem Rechner betrieben, sondern arbeitet in einem Systemverbund mit mehreren Datenbanken und Servern zusammen. Daher kann das Layoutwerkzeug nicht wie in der bisherigen Realisierung lokal eingerichtet und genutzt werden, sondern muss serverseitig in das Fabrikplanungssystem eingebunden werden. **Abbildung 4-8** zeigt den allgemeinen Aufbau eines Bentley-Fabrikplanungssystems (vgl. auch die Beschreibungen zum HLS und FAPLIS in Kapitel 2.5.1).

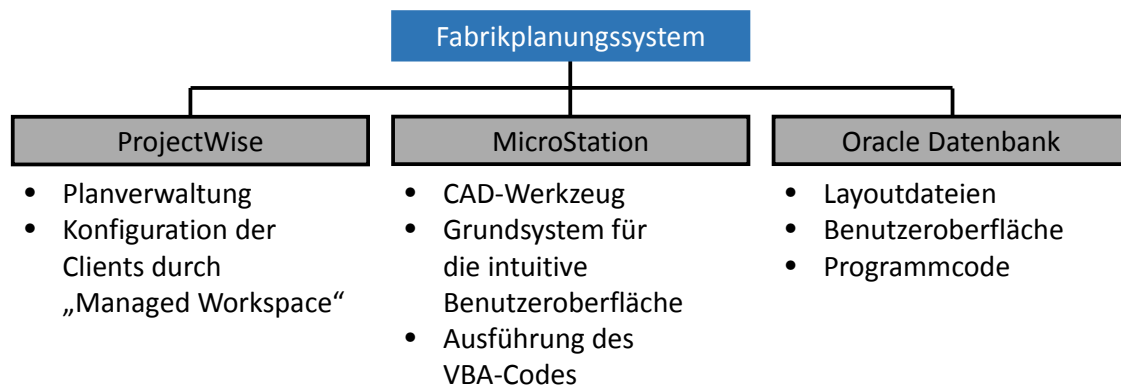


Abbildung 4-8: Aufbau eines Bentley-Fabrikplanungssystems [in Anlehnung an König 2013, S. 48]

Ein Bentley-Fabrikplanungssystem besteht aus der MicroStation als CAD-Werkzeug, welches wie zuvor die Benutzeroberfläche darstellt und den Programmcode ausführt. Diese Daten sind jedoch nicht lokal abgelegt, sondern werden wie auch die Layoutdateien in einer Datenbank auf einem Server gespeichert. Abgerufen werden die Daten mit der Planverwaltungssoftware ProjectWise (**Abbildung 4-9**).

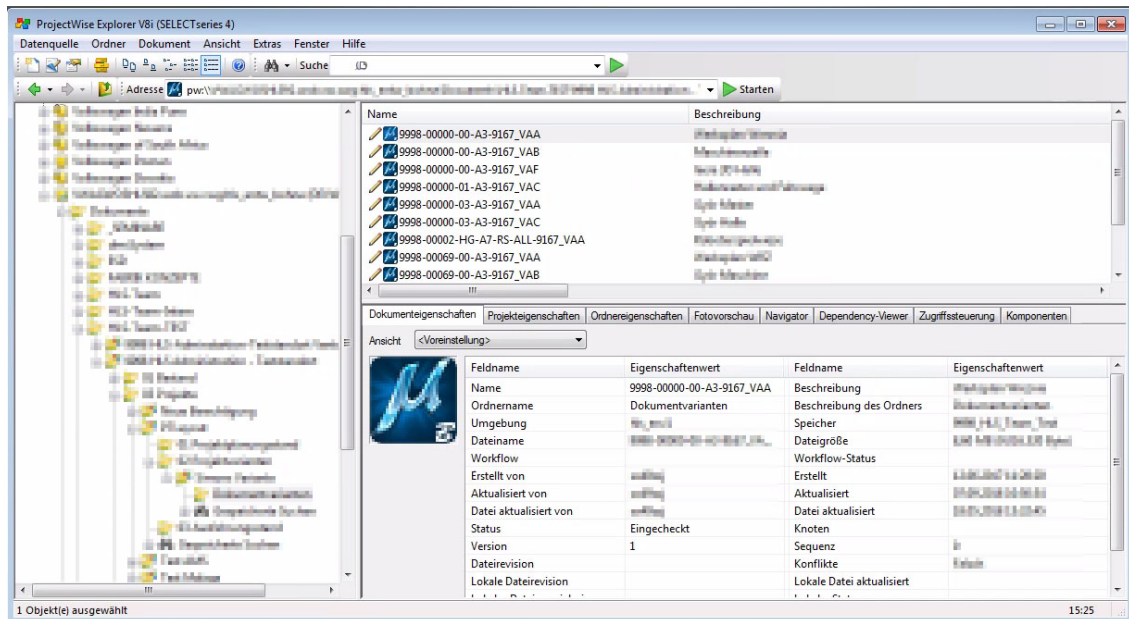


Abbildung 4-9: Benutzeroberfläche Bentley ProjectWise v8i SS4 [vgl. Bentley Systems 2015, S. 3]

Die linke Seite der Benutzeroberfläche zeigt die Struktur der Datenablage, welche aus mehreren Datenbanken und einzelnen Ordnern besteht. Auf der rechten Seite werden oben die Dateien und unten die Dateieigenschaften angezeigt.

Layoutdateien werden wie lokal gespeicherte Daten geöffnet, Programm- und Menüdaten automatisch in die Konfiguration des Clients übertragen. Hierzu dient der „Managed Workspace“, ein serverseitig konfigurierbarer Arbeitsbereich, welcher Konfigurationsdateien und Programmeinstellungen vorhält und bei Nutzung des Fabrikplanungssystems den lokalen Arbeitsbereich des Clients ersetzt. Somit müssen die Clients des Fabrikplanungssystems nicht einzeln angepasst werden. **Abbildung 4-10** stellt die grundsätzliche Kommunikation zwischen Server und Client schematisch dar.

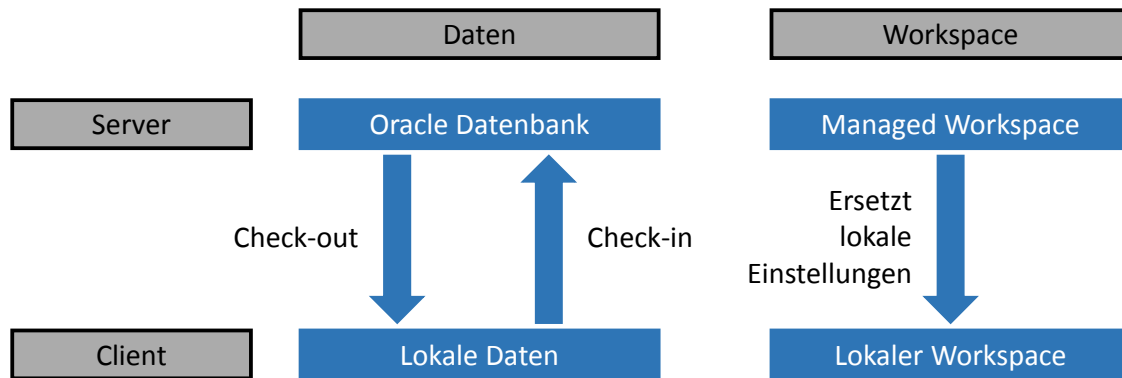


Abbildung 4-10: Kommunikation zwischen Server und Client im Fabrikplanungssystem

Beim Öffnen einer im Fabrikplanungssystem gespeicherten Layoutdatei wird diese „ausgecheckt“, d.h. kein anderer Client kann Änderungen an dieser Datei vornehmen. Eine Kopie der Datei wird dann lokal auf dem Client gespeichert und kann bearbeitet werden. Die eingefügten Referenzen (vgl. Kapitel 2.3.3) verweisen direkt auf die andere Layoutdateien in der Datenbank. Somit entstehen komplexe Datenstrukturen, die systemweit einheitlich abrufbar sind. Durch das „Einchecken“ werden die Änderungen auf den Server übertragen und die Datei steht anderen Clients in der neuen Version wieder zur Verfügung. Durch diese Vorgehensweise werden Inkonsistenzen im Datenbestand vermieden.

Die Programm- und Menüdaten aus dem „Managed Workspace“ werden ebenfalls auf den Client kopiert und ersetzen dort die lokalen Einstellungen. Bei jedem Öffnen einer Layoutdatei wird der „Managed Workspace“ mit dem lokalen Arbeitsbereich verglichen und dieser ggf. aktualisiert. „Ein“- und „Auschecken“ ist hierbei nicht notwendig, da der Client keine Änderungen an diesen Konfigurationsdaten vornehmen kann. Welche Konfigurationsdateien in den Workspace geladen werden, unterscheidet sich je nach Datei. Der Nutzer hat zusätzlich die Möglichkeit weitere Einstellungen durch einen Konfigurationsblock einer Datei hinzuzufügen. Dies wird auch für die Einbindung von PTLLayout genutzt (Abbildung 4-11).

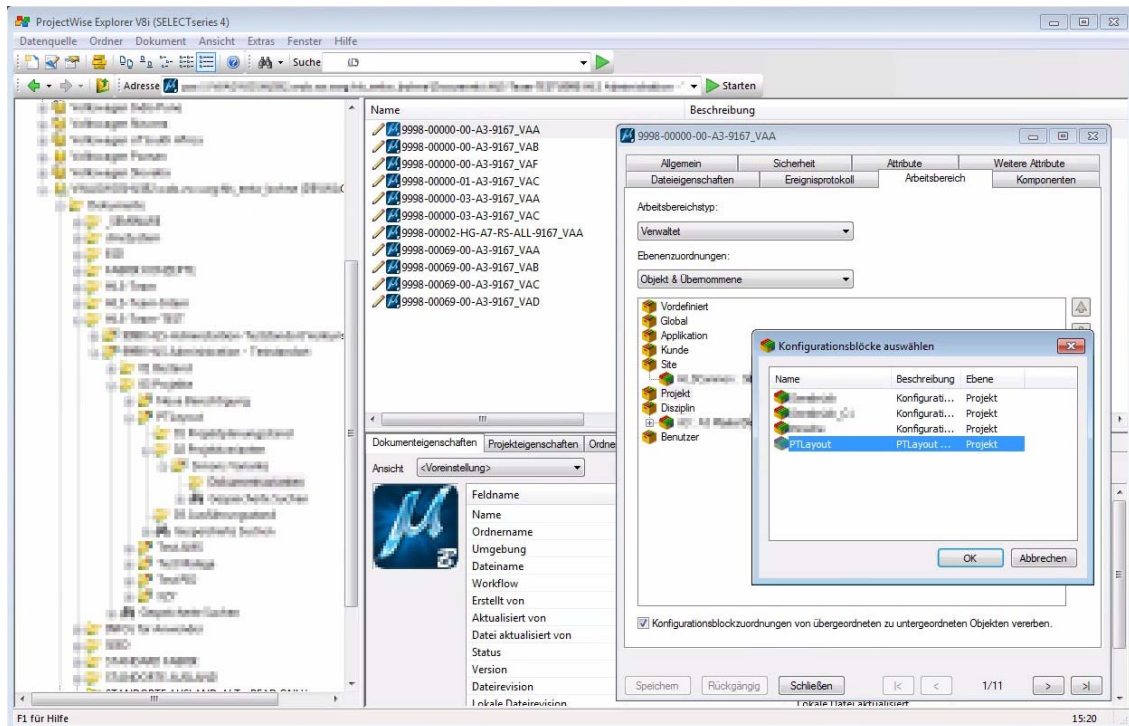


Abbildung 4-11: Anhängen des Konfigurationsblocks von PTLLayout an eine Layoutdatei

Durch das An- bzw. Abhängen des Konfigurationsblocks von PTLLayout kann bestimmt werden, ob die Benutzeroberfläche des intuitiven digitalen Layoutwerkzeugs beim Öffnen bestimmter Dateien geladen werden soll. Dazu wird im Eigenschaftensfenster des Layouts im Arbeitsbereich der Konfigurationsblock ausgewählt (in Abbildung auf der rechten Seite). Über den „Managed Workspace“ kann diese Einstellung auch systemweit für ganze Bereiche oder Planarten vorgenommen werden. Großer Vorteil an dieser Vorgehensweise ist, dass weiterhin alle Grundfunktionen des Planungssystems erhalten bleiben und flexibel entschieden werden kann, welche Oberfläche und welche Werkzeuge genutzt werden sollen.

Das Ergebnis der Umsetzung wurde mit Planern des OEM ausführlich besprochen und an die Belange des industriellen Einsatzes fortlaufend angepasst. Die technischen Voraussetzungen sind dabei sehr niedrig. Für die Nutzung ist lediglich ein CAD-fähiger Rechner mit einer Installation des Fabrikplanungssystems notwendig. PTLLayout ist zur Anzeige und Bedienung auf einem Touch-Display konzipiert. Im Zuge der Pilotanwendung (vgl. Kapitel 5.2) wurde dazu vor allem ein Multi-Touch Planungstisch eingesetzt (**Abbildung 4-12**).



Abbildung 4-12: Planungstisch für die Pilotanwendung von PTLayout [Quelle: eKiosk 2019]

Der verwendete Planungstisch besteht aus einem höhenverstellbaren Rahmen, in welchen ein 55 Zoll Display eingelassen ist. Die Größe erlaubt auch mehreren Personen in einer Planungssitzung gemeinsam ein Layout zu entwickeln. PTLayout kann jedoch auch auf anderen Touch-Displays oder Tablets verschiedener Größen genutzt werden. Voraussetzung ist jeweils nur die Installation des Grundsystems. Auch diese Möglichkeiten wurden während der Pilotanwendung umfangreich getestet.

5 Praktische Anwendungen und Bewertung

In diesem Kapitel soll die Bewertung des auf Basis des Konzepts realisierten Prototyps vorgenommen werden. Es ist zu überprüfen, ob die Eigenschaften der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung zur Unterstützung der frühen Planungsphasen in der Automobilindustrie beitragen können und ob der Prototyp über den entsprechenden Funktionsumfang verfügt. Insbesondere ist die Integration von Entscheidungsträgern in den direkten Planungsprozess zu untersuchen. In diesem Rahmen soll sowohl das Konzept als auch die prototypische Realisierung der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung untersucht werden. Diesbezüglich sollen die Eigenschaften Einfachheit der Bedienung, Schnelligkeit der Planung und die ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung untersucht werden (vgl. Kapitel 3.1).

Um die Erfüllung dieser Merkmale objektiv überprüfen zu können, ist es sinnvoll, hierfür quantifizierbare Kriterien zu definieren. Entsprechend der Ausführungen für die erfolgreiche Partizipation in Kapitel 2.4.3 sollen dies die „Reduzierung der Planungszeit“ und die „Erhöhung der Planungsqualität“ sein.

Die Reduzierung der Planungszeit kann durch den Vergleich mit anderen Methoden und Werkzeugen direkt gemessen werden. Die Qualität der Planung soll hinsichtlich der korrekten Datenerstellung und vollständiger Dokumentation kontrolliert werden, da die Bewertung des Prototyps im Vordergrund steht. Eine Bewertung des planerischen Endergebnisses findet nur durch die Überprüfung der Plausibilität statt, da aufgrund der vielfältigen Ziele der Fabriklayoutplanung (vgl. Kapitel 2.2.1 und 3.2.1) die Tests nur eingeschränkt vergleichbar wären. Die Einfachheit der Bedienung soll über das Feedback der Anwender bzw. über die erfolgreiche Partizipation von Entscheidungsträgern direkt bewertet werden.

Die spezifisch für die intuitive digitale Fabriklayoutplanung zu überprüfenden Kriterien sind in **Tabelle 5-1** zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Spezifische Bewertungskriterien für PTLayout

Eigenschaft der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung	Bewertungskriterium	Kurzbeschreibung
Einfachheit der Bedienung	Feedback Anwender/ Integration von Entscheidungssträgern	Einbindung u. Partizipation in den Planungsprozess
Schnelligkeit der Planung	Reduzierung der Planungszeit	Vergleich der Planungszeit verschiedener Methoden und Werkzeuge
Ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung	Erhöhung der Planungsqualität	Konformität der Daten, Dokumentation

Zusätzliche, allgemeine Kriterien zur Bewertung eines Layoutwerkzeugs wurden von *Shariatzadeh et al.* erarbeitet. Die fünf übergeordneten Bereiche sind in **Tabelle 5-2** aufgeführt.

Tabelle 5-2: Allgemeine Bewertungsbereiche eines Layoutwerkzeugs [in Anlehnung an Shariatzadeh et al. 2012, S. 300-304]

Bewertungsbereich	Kurzbeschreibung
Layouterstellung	Verfügbarkeit verschiedener Ansichten, 2D und 3D-Layouts, Verfügbarkeit aller notwendigen Werkzeuge
Koordination verschiedener Layouts	Datenmanagement, Variantenbildung, Referenzen, Wiederverwendung von Teilergebnissen
Änderungsmanagement	Versionierung, Freigabe, Rechte- und Rollenverwaltung, Dokumentation
Verifikation eines Layouts	Kollisionsprüfung, Prüfung hinsichtlich gesetzlicher Vorgaben
Effizienz, Gebrauchstauglichkeit und Erweiterungsfähigkeit	Benutzerfreundlichkeit, Effizienz im Umgang mit großen Daten, Programmschnittstellen

Zur Überprüfung aller aufgeführten Kriterien, besteht die Untersuchung aus mehreren, sich gegenseitig ergänzenden Teilen. Im ersten Teil werden Anwendertests unter kontrollierten Bedingungen (Kapitel 5.1) durchgeführt, welche aus der Untersuchung der Interaktion der Anwender mit dem Prototyp sowie einem Vergleich mit anderen Methoden und Werkzeugen bestehen. In diesem Untersuchungsteil sollen die „Einfachheit der Bedienung“ sowie die „Schnelligkeit

der Planung“ bewertet werden. Die Tests werden für die Vergleichbarkeit anhand eines einheitlichen Anwendungsbeispiels durchgeführt.

Im zweiten Teil wird der Prototyp im Rahmen einer Pilotanwendung in der Industrie getestet (Kapitel 5.2), um den Einsatz in einer „ganzheitlichen Daten- und Planungsumgebung“ zu untersuchen und die Ergebnisse des Anwendertests unter realen Bedingungen zu überprüfen.

Beide Untersuchungsteile wurden im Rahmen einer formativen Evaluation¹⁰ fortlaufend begleitet, so dass Verbesserungen in die Entwicklung einfließen konnten. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Kapitel 6 anschließend dargestellt und kritisch reflektiert.

5.1 Anwendertests

Zur Untersuchung des Layoutwerkzeugs wurden mehrere Anwendertests durchgeführt. Diese Tests fanden im Rahmen eines einheitlichen Anwendungsbeispiels unter kontrollierten Idealbedingungen statt, um Störeinflüsse, wie Unternehmenspolitik oder hierarchische Effekte (vgl. Kapitel 2.4.3), ausschließen zu können.

Zunächst werden das Anwendungsbeispiel und die Aufgabenstellung beschrieben (Kapitel 5.1.1), gefolgt von der Darstellung eines Gruppentests zur Überprüfung der „Einfachheit der Bedienung“ (Kapitel 5.1.2) sowie dem Vergleich mit anderen Methoden (Kapitel 5.1.3), um die „Schnelligkeit der Planung“ zu belegen.

5.1.1 Beschreibung Anwendungsbeispiel und Aufgabenstellung

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Anwendertests in Kapitel 5.1.2 und 5.1.3 basieren die Untersuchungen auf einem einheitlichen Planungsfall, welcher aus der „Volkswagen Standardfabrik“ abgeleitet wurde.

¹⁰ Formative Evaluation ist die aktiv-gestaltende, konstruktive Untersuchung, die aufgrund von Zwischenergebnissen Korrekturen laufender Entwicklungen ermöglicht, um die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung zu erhöhen. Im Gegensatz dazu steht die summative Evaluation, die lediglich zusammenfassend den erreichten Endzustand bewertet. [vgl. u.a. Endruweit et al. 2014, S. 110]

Dieses Konzept der Standardfabrik dient der Volkswagen AG als Vorlage für neue Werke und wurde aus einer Analyse bestehender Standorte entwickelt [Macht 2011]. Das erste Werk, welches nach diesen Vorgaben gebaut wurde, ist das 2011 eröffnete Werk Chattanooga in Tennessee, USA (**Abbildung 5-1**).



Abbildung 5-1: Volkswagen Werk Chattanooga [Quelle: Volkswagen AG]

Die Pläne umfassen neben einem Standardlayout weitere Vereinheitlichungen, etwa hinsichtlich Prozessen, Logistikkonzept und Produktionssteuerung. Ziel ist es, auf allen Kontinenten schnell eine Fabrik planen zu können [Freitag 2014]. Die Pläne der Standardfabrik dienen dabei als Ausgangsbasis und werden entsprechend den Anforderungen des zu produzierenden Automodells und des Standorts angepasst [Gabbatsch 2015].

Aufgrund der Standardisierung und der Übertragbarkeit auf weltweite Fabrikplanungsvorhaben der Automobilindustrie wurde dieses Planungskonzept als Ausgangsbasis für den Anwendungsfall zur Untersuchung der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung gewählt. **Abbildung 5-2** zeigt das Blocklayout und die Erweiterungsstrategie der Standardfabrik.

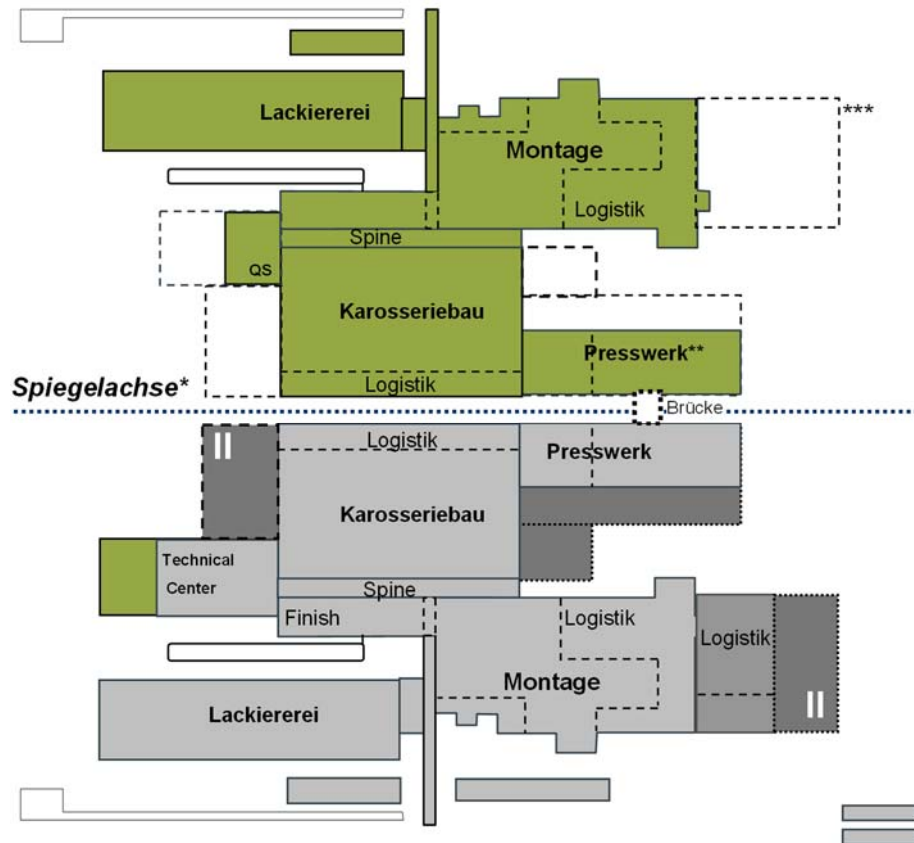


Abbildung 5-2: Fabriklayout und Erweiterungskonzept der Volkswagen Standardfabrik [Bischoff 2016, S. 22]

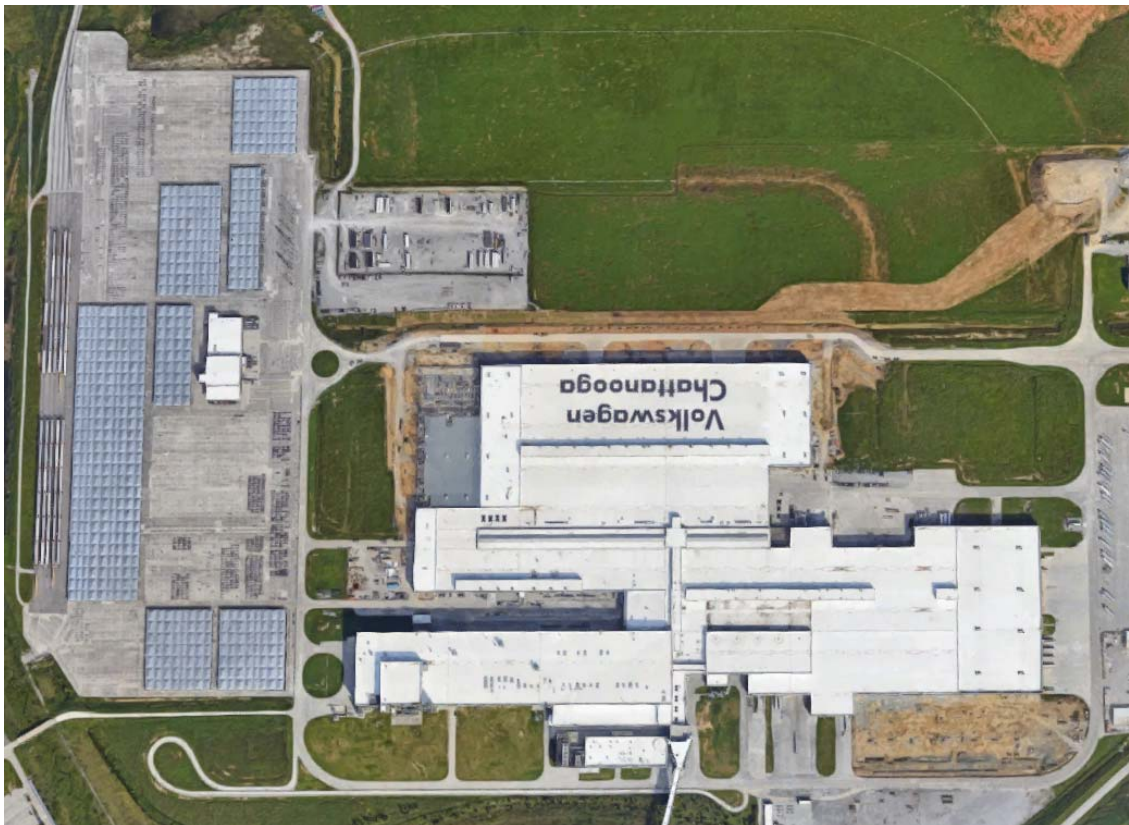


Abbildung 5-3: Satellitenbild des Volkswagen Werks Chattanooga [Quelle: Google Maps]

Das Konzept der Standardfabrik sieht vor, zunächst in der Ausbaustufe I (hellgrau) zu fertigen und bei Bedarf die Produktionskapazität zu verdoppeln, indem die bestehenden Produktionsbereiche durch Ausbaustufe II (dunkelgrau) erweitert werden und die Taktzeit durch Anpassung der Produktionstechnik halbiert wird. Mit der Ausbaustufe III (grün), welche eine Spiegelung der Ausbaustufen I und II darstellt, kann eine zweite Linie aufgebaut werden, so dass die Leistung der bisherigen Ausbaustufen nochmals verdoppelt wird [Bischoff 2016, S. 22].

Basierend auf den öffentlich verfügbaren Angaben zum Werk Chattanooga (siehe bspw. VWoA 2019) und durch Auswertung des Satellitenbilds des Werks (**Abbildung 5-3**) wurden die Flächenbedarfe der Produktionsbereiche und die Grundstücksgröße ermittelt. Zudem wurden weitere Standorte des Volkswagen Konzerns, welche nach der Vorlage des Standardwerks gebaut wurden (u.a. Września und Anting), nach dieser Methode analysiert und die Werte gemittelt, um die produkt- und standortspezifischen Abweichungen zwischen den Werken zu minimieren. Aus diesen Daten entstand ein Anforderungskatalog mit Vorgaben zu einer Fabriklayoutplanung, der als Anwendungsbeispiel Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen war. **Tabelle 5-3** und **Tabelle 5-4** führen die Vorgabewerte der Planung auf.

Tabelle 5-3: Vorgaben zur Dimensionierung der Bereiche

Bereich	Fläche (m ²)
Karosseriebau	35.000
Logistik	18.500
Presswerk	19.000
Lackiererei	30.000
Teststrecke	2.000 m (Streckenlänge)
Abstellfläche und Versand (Fertigfahrzeuge)	15.000
Mediencenter	5.000
Abwasseraufbereitung	3.000
Parkplatz (Mitarbeiter)	12.000
Trainingscenter	2.500
Technical Center	9.000
Sequenzspeicher 2	10.000
Verwaltung	8.000
Rechenzentrum	1.500
Montage	40.000
Finish	9.000

Tabelle 5-4: Vorgaben Raster der Produktionsbereiche

Bereich	Raster (m*m)
Karosseriebau	24*24
Presswerk	32,5*32,5
Lackiererei	12*12 oder 12*15
Montage	24*24

Die Aufgabenstellung lautete, mit den gegebenen Werten eine ideale Generalbebauungsplanung eines PKW-Gesamtfahrzeugwerks mit dem gesamten Produktionsprozess (Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Montage) zu entwickeln. Weitere Komponenten wie Motor, Getriebe und Fahrwerk werden von anderen Standorten zugeliefert. **Abbildung 5-4** zeigt den Tätigkeitsumfang der Aufgabe anhand der VDI 5200 Blatt 1.

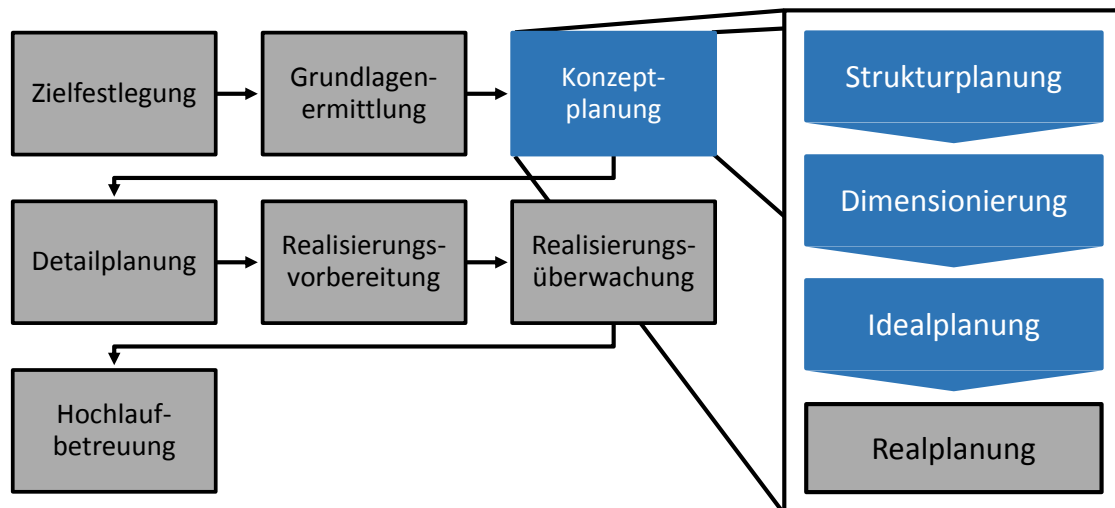


Abbildung 5-4: Umfang der Aufgabenstellung in den Fabrikplanungsphasen nach VDI 5200 Blatt 1

Zielfestlegung und Grundlagenermittlung sind durch die Aufgabenstellung vorgegeben. Durchzuführen ist die Konzeptplanung bis zur Phase der Idealplanung. Als Grundlage der Greenfield-Planung wird der Standort Deutschland angenommen, so dass keine regionalen Besonderheiten zu beachten sind. Wesentliches Augenmerk soll bei der Planung auf die Erweiterungsflexibilität gelegt werden. Angestrebt wird ein Jahresproduktionsprogramm von 150.000 gefertigten Fahrzeugen im 3-Schicht-Betrieb. Ausgehend von einer Produktionskapazität von 60 Fahrzeugen pro Stunde (jobs per hour/JPH) soll zudem eine mögliche Verdopplung der Kapazität auf 120 JPH geplant werden. Diese Erweiterung soll ferner für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, Elektromotor und Hybrid-Versionen (Internal Combustion Engine Vehicle / ICEV, Battery Electric Vehicle / BEV, Hybrid Electric Vehicle / HEV) vorbereitet sein, so dass hier die Wandlungsfähigkeit im Vordergrund steht.

In der Aufgabenstellung wird zu jedem Bereich eine Kurzbeschreibung aufgeführt, um einen schnellen Überblick zu gewährleisten. Des Weiteren werden die zu berücksichtigenden Flüsse sowie weitere wesentliche Planungsprämissen und Kennzahlen des Werks angegeben. Die vollständige Aufgabenstellung kann dem Anhang I bis VI entnommen werden.

5.1.2 Gruppentest

Am IMAB (Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit an der TU Clausthal) wurden 21 Planungen des Anwendungsbeispiels mit insgesamt 70 Studenten durchgeführt. Dazu bildeten die Teilnehmer nach dem Vorbild industrieller Planungen Projektteams. Je zwei bis vier Studenten bearbeiteten die Aufgabe gemeinsam. Der Einsatz des Prototyps des Layoutwerkzeugs war in die Arbeit mit der Grundversion der Bentley MicroStation v8i SS4 eingebunden, so dass die Teilnehmer einen Vergleich ziehen konnten.

In dieser Versuchsanordnung sollte untersucht werden, ob es Studenten, die zuvor keine Erfahrungen mit der CAD-Planung in der Bentley MicroStation hatten, möglich ist, eine zu einem Fabrikplanungssystem konforme Layoutdatei zu erzeugen (Maßstab für die Qualität der Planung, vgl. Einleitung Kapitel 5) und wie der subjektive Unterschied der Intuitivität des Prototyps gegenüber der Grundversion des Programms ausfiel. Überprüft wird somit die „Einfachheit der Bedienung“ der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung (vgl. Kapitel 3.1.1). Dafür wurden nach der Arbeit mit den Systemen über einen Fragebogen die Zustimmung zu verschiedenen Aussagen zum Grundsystem und zum Prototypen aufgenommen. **Abbildung 5-5** zeigt die Auswertung des Durchgangs im Wintersemester 2017/18.

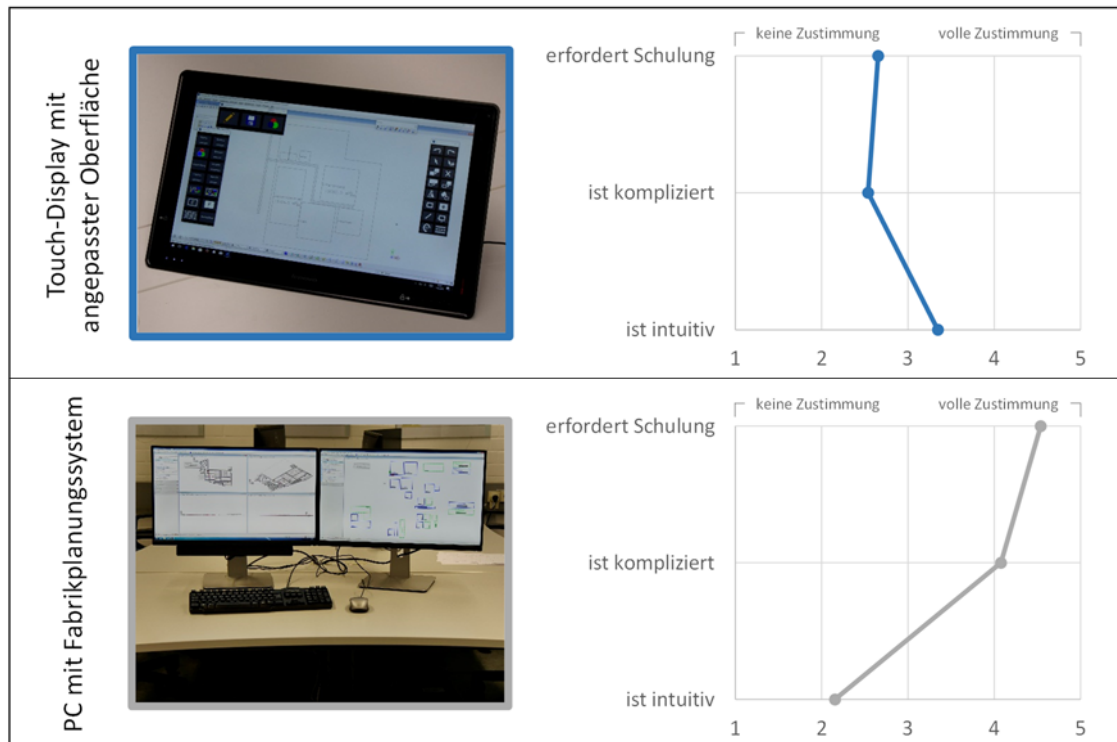


Abbildung 5-5: Zustimmungswerte der Anwender zu Aussagen über verschiedene Planungssysteme im WS 2017/18 [Schäfer und Bracht 2018, S. 615]

Die Diagramme zeigen einen deutlichen Unterschied bezüglich der empfundenen Komplexität und der Notwendigkeit einer Schulung auf. Gegenüber dem PC mit Fabrikplanungssystem wurde das Touch-Display mit der angepassten Oberfläche des Prototyps als wesentlich intuitiver eingeordnet und weniger kompliziert eingeordnet. Die Bewertung der Intuitivität stieg um 1,2 Punkte und die Bewertung der Komplexität sank um 1,6 Punkte (Skala von 1 bis 5). Im gleichen Zuge verringerte sich auch die Einschätzung, dass für die Benutzung eine Schulung notwendig ist (1,9 Punkte Unterschied). Nach verschiedenen Verbesserungen, die unter anderem nach der Untersuchung mit den Studenten erarbeitet und besprochen wurden, aber auch aus den Erkenntnissen des Einsatzes in der Industrie (vgl. Kapitel 5.2) resultierten, wurde die gleiche Befragung im Wintersemester 2018/19 abermals durchgeführt (**Abbildung 5-6**).

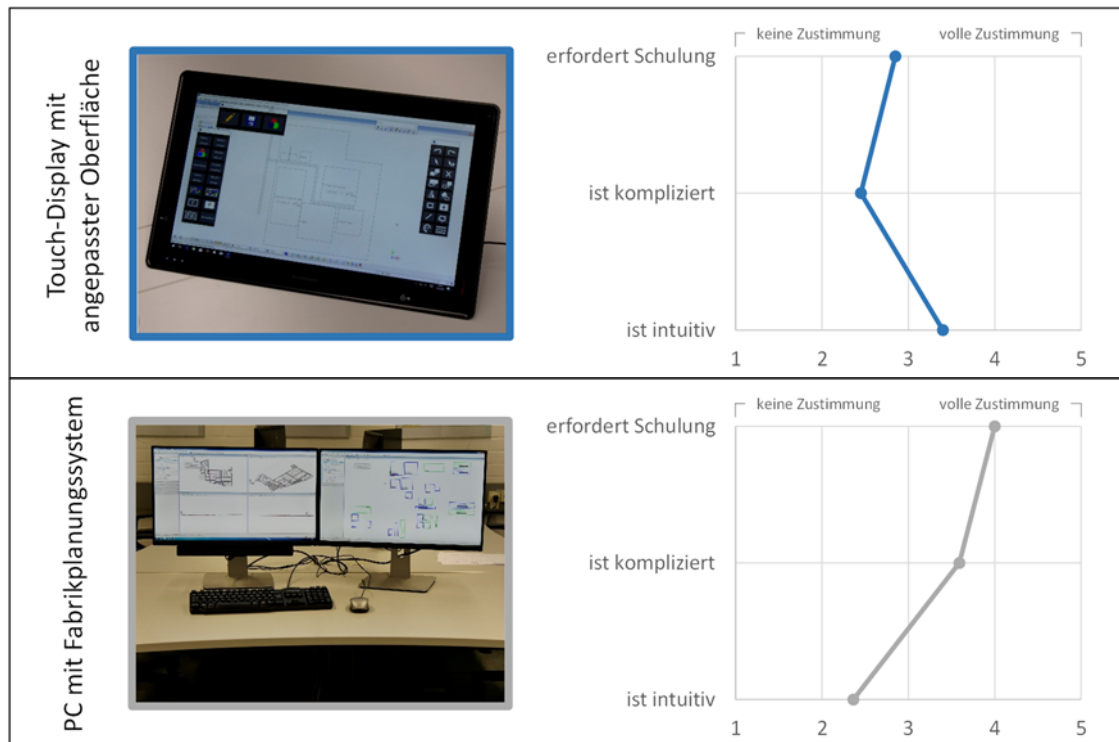


Abbildung 5-6: Zustimmungswerte der Anwender zu Aussagen über verschiedene Planungssysteme im WS 2018/19

Wie zu erkennen ist, konnte ein Unterschied bei dem Nutzerempfinden dokumentiert werden. Die Touch-Oberfläche wurde gegenüber dem vorherigen Durchgang als in etwa gleich kompliziert empfunden, jedoch wurde sie auch geringfügig intuitiver eingeordnet. Die empfundene Notwendigkeit einer Schulung ist gewachsen, was wahrscheinlich auf den gestiegenen Funktionsumfang zurückzuführen ist. Die Einschätzung der Nutzer bezüglich des Fabrikplanungssystems fiel nicht mehr so extrem aus. Dies ist als Folge der überarbeiteten und verbesserten Einarbeitung in die Software zu interpretieren.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Prototyp die Eigenschaft der „Einfachheit der Bedienung“ der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung erfüllt. Den Studenten, die zuvor keine Erfahrungen mit der Layoutplanung in der Bentley MicroStation hatten, war es mit dem Prototyp möglich, eine Layoutdatei zu erzeugen, die den formalen Bedingungen entspricht. Gleichzeitig konnte im Vergleich mit dem Grundsystem gezeigt werden, dass die neue Touch-Oberfläche als intuitiver und weniger kompliziert wahrgenommen wurde sowie in der Folge die Notwendigkeit einer Schulung reduziert werden konnte.

5.1.3 Vergleich mit anderen Methoden und Werkzeugen

Zusätzlich zu den in Kapitel 5.1.2 durchgeführten Untersuchungen wurde das Anwendungsbeispiel genutzt, um mehrere Planungsmethoden bzw. –werkzeuge miteinander zu vergleichen. Diese waren:

- Prototyp des Layoutwerkzeugs
- Papierschiebelayout
- visTable

Diese Auswahl umfasst unterschiedliche intuitive Methoden bzw. Werkzeuge der Layoutplanung (vgl. Kapitel 2.5). Mit der Gegenüberstellung sollte vor allem der Umgang der Teilnehmer mit der Planungsmethode bzw. dem –werkzeug sowie die Schnelligkeit der Planung untersucht werden. Hierzu wurde die Bearbeitung der Aufgabe, im Gegensatz zu den Tests in Kapitel 5.1.2, von nur zwei Teilnehmern gemeinsam bearbeitet. Somit konnten gruppendynamische Prozesse ¹¹ ausgeschlossen werden. Diese treten in jeder Gruppe unterschiedlich ausgeprägt auf und hätten die Bearbeitungszeit beeinflusst und dadurch die Ergebnisse verfälscht.

Die 18 Teilnehmer dieser Untersuchung bearbeiteten die ihnen zuvor unbekannte Aufgabe nur einmal und nutzen nur eine der Methoden bzw. eines der Werkzeuge. Ebenso wie bei den Studenten der Tests in Kapitel 5.1.2 wurde darauf geachtet, dass keiner der Teilnehmer zuvor Erfahrungen mit der jeweiligen Methode oder dem Werkzeug hatte. Es konnte hierdurch verhindert werden, dass sich die Bearbeitungszeit durch Erfahrungen im Umgang mit der Methode/dem Werkzeug oder durch die zunehmende Kenntnis der Aufgabenstellung in weiteren Durchgängen verkürzt und die Vergleichbarkeit der Methoden und Werkzeuge erschwert. Die Vor- und Nachbereitungszeiten sowie die Planungszeiten stellt **Abbildung 5-7** gegenüber.

¹¹ Als „soziale Gruppe“ gelten in Soziologie und Psychologie Gruppen ab drei Personen [vgl. u.a. Schäfers 1999, S. 21 oder Endruweit et al. 2014, S. 158]. Zu gruppendynamischen Prozessen siehe bspw. das Phasenmodell der Gruppenentwicklung nach *Tuckman* [Tuckman 1965; Tuckman und Jensen 1977]

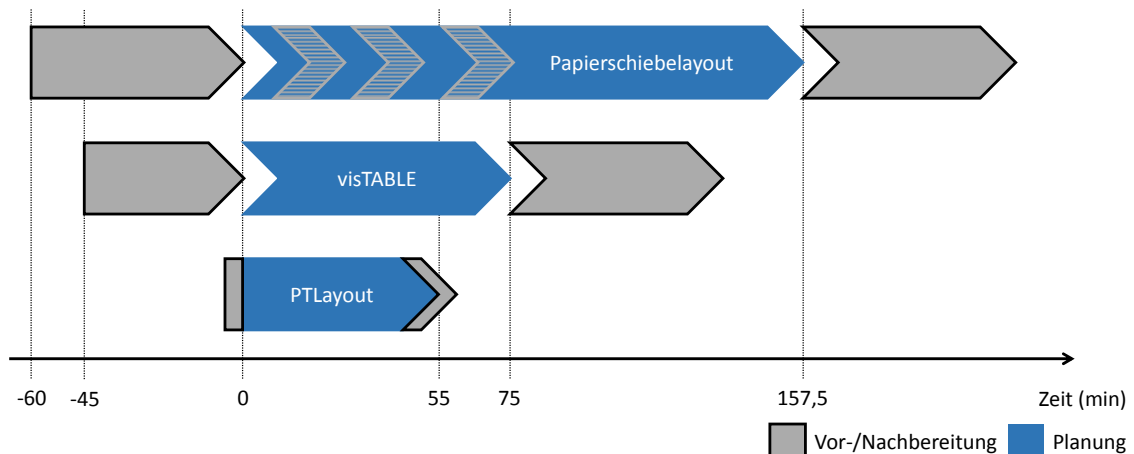


Abbildung 5-7: Zeitbedarf der Planungsmethoden/-werkzeuge

Die Planungszeiten der beiden digitalen Werkzeuge sind gegenüber der analogen Methode des Papierschiebelayouts deutlich geringer. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass beim Papierschiebelayout immer wieder neue Elemente vorbereitet werden müssen, die erst während der Planung erforderlich wurden. Dies verzögert dementsprechend die Planung und wurde in der Abbildung mit mehreren kurzen Phasen gekennzeichnet. Nach dem Abschluss der Layoutplanung muss das Ergebnis zusätzlich noch digitalisiert werden. Dies geschieht in der Industrie durch die fotografische Dokumentation und die Nachmodellierung durch einen Zeichner, was in der Untersuchung durch einen im Umgang mit dem Programm erfahrenen Studenten durchgeführt wurde (**Abbildung 5-8**).

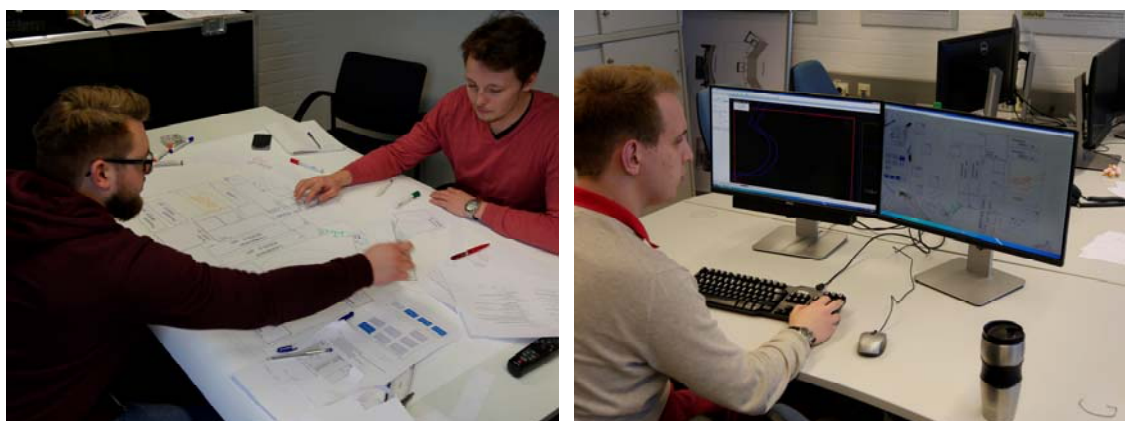


Abbildung 5-8: Layoutplanung mit einem Papierschiebelayout und Nachzeichnen am PC

Bei der nachträglichen Übertragung der Ergebnisse in ein digitales Layout konnte beobachtet werden, dass in erheblichem Maße Informationsverluste auftreten, da

nicht alle notwendigen Informationen in der Fotografie des Papierlayouts oder diesem selbst vorliegen. Dies betrifft sowohl einzelne Maße von Flächen, welche zwar maßstabsgerecht erstellt wurden, jedoch nicht auf den Elementen verzeichnet wurden, Abstände zwischen Flächenelementen als auch Missverständnisse in der Ausrichtung aufgrund unpräziser Positionierung oder versehentlichem Verschieben der Elemente. Dies kann nur durch eine abschließende Fixierung des Layouts verhindert werden. Die verwendeten Symbole mussten gesondert dokumentiert werden, was jedoch nicht immer erfolgte. Ebenso war teilweise die Lesbarkeit von Anmerkungen ein Problem. Sofern fehlende oder fehlerhafte Informationen überhaupt erkannt wurden, mussten diese erst durch Nachmessen oder Erfragen ermittelt werden, wobei weitere Fehler aufgetreten sind. Zudem nimmt dieser Prozess im Vergleich mit der rein digitalen Planung (**Abbildung 5-9**) viel Zeit in Anspruch.



Abbildung 5-9: Layoutplanung am Touch-Display mit PTLayout (links) und visTable (rechts)

Neben einer um 20 Minuten kürzeren Planungszeit (vgl. Abbildung 5-7) zeichnet sich der Prototyp gegenüber dem digitalen Layoutwerkzeug visTable vor allem durch die Reduzierung der Vor- und Nachbereitung der Planung aus. Zu Beginn und zum Abschluss der Layoutentwicklung müssen lediglich die Dateien aus dem Planverwaltungssystem ausgecheckt bzw. wieder eingchecked werden (vgl. Kapitel 4.2.2). Dies konnte aufgrund der direkten Anbindung an die Bentley MicroStation erreicht werden, wodurch nachträgliches Konvertieren und Aufbereiten überflüssig sind. Zu Beginn erfolgte, wie bei dem Einsatz jeder neuen Methode oder eines neuen Werkzeugs, eine kurze Einführung zur Vorgehensweise und dem Funktionsumfang von PTLayout. Darüber hinaus wurde keine weitere

methodische oder inhaltliche Vorbereitung durchgeführt. Die Nachbereitung bestand lediglich in der Überprüfung des Planungsergebnisses und der Kontrolle der Vollständigkeit und Einhaltung aller Vorgaben sowie der automatisierten Übertragung der Daten an das Fabrikplanungssystem.

5.1.4 Beispielhafte Planungsergebnisse

Insgesamt entwickelten die verschiedenen Gruppen im Laufe der Untersuchungen 21 verschiedene Fabriklayouts. Im Folgenden wird eines der Layouts und seine Entwicklungsschritte beispielhaft dargestellt.

Hierbei ist zu beachten, dass die möglichen Zielfelder der Planung (vgl. Kapitel 3.2.1) sehr komplex und die Bewertung und der Vergleich von Fabriklayouts anspruchsvolle und stark subjektiv geprägte Aufgaben sind (vgl. Kapitel 3.2.2). Infolgedessen sind qualitative Aussagen, die auf der Bewertung eines Layouts basieren, nur bedingt geeignet, um Rückschlüsse auf die zur Entwicklung der Layouts genutzten Methoden oder Werkzeuge zu ziehen.

Die fabrikplanerische Qualität der im Gruppentest entwickelten Fabriklayouts wurde daher nicht zur Bewertung der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung herangezogen, sondern dienten einer Vollständigkeits- und Plausibilitätsprüfung. Die Überprüfung der Fabriklayouts bezog sich auf die Kontrolle der Einhaltung aller Vorgaben, wie der Platzierung aller Strukturelemente sowie der Erreichung eines sinnvollen und nachvollziehbaren Konzepts, und der Daten-Konformität der Layoutdatei.

Zu Beginn der Entwicklung eines Fabriklayouts wurden zunächst die ersten Flächenelemente angelegt und eine grobe Orientierung auf der zur Verfügung stehenden Grundstücksfläche vorgenommen (**Abbildung 5-10**). Diese initiale Anordnung wurde um weitere Gebäude ergänzt und hinsichtlich grundsätzlicher Ziele, wie etwa der Ausrichtung nach Haupttransportachsen, optimiert (**Abbildung 5-11**).

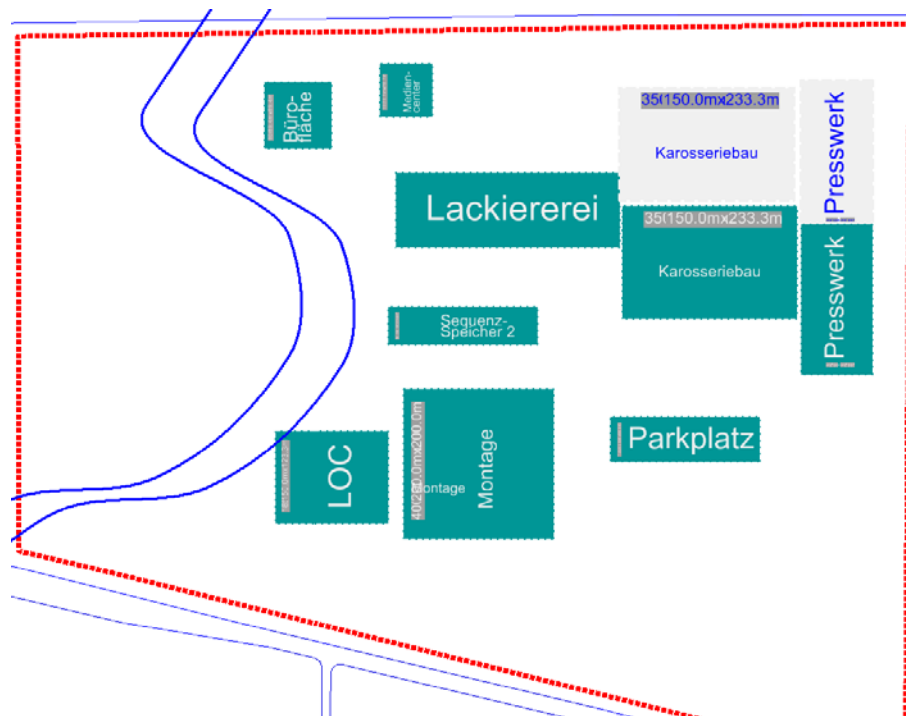


Abbildung 5-10: Erste grobe Anordnung der Bereiche

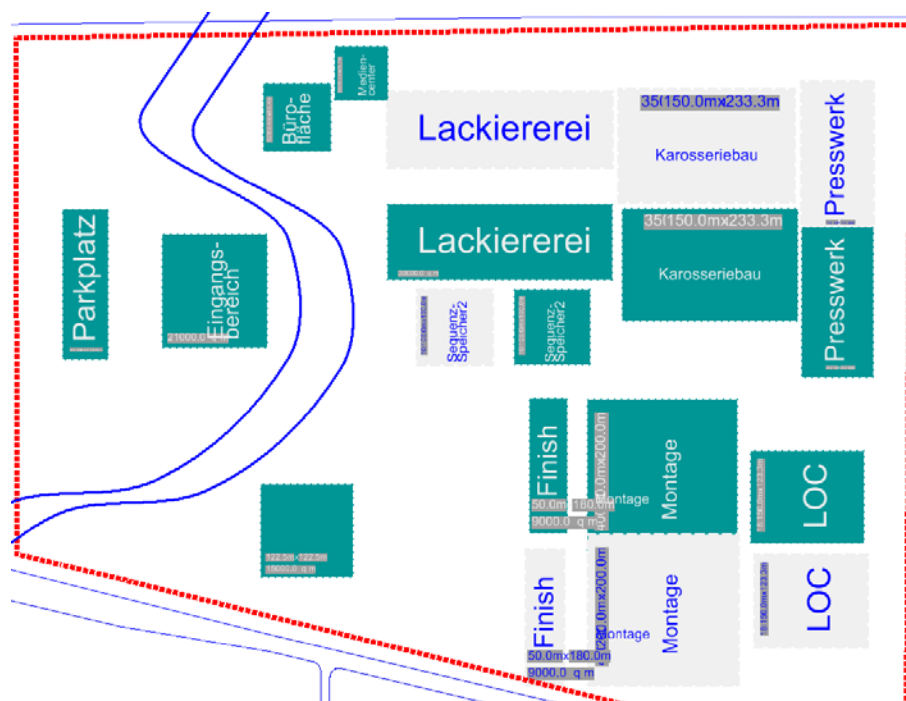


Abbildung 5-11: Zwischenschritt der Entwicklung des Fabriklayouts



Abbildung 5-12: Endergebnis des Fabriklayouts

Im Endergebnis der Planung (**Abbildung 5-12**) wurden die positionierten Flächen nach einem Raster ausgerichtet und weitere kleine Anpassungen vorgenommen. Bei der abschließenden Überprüfung wurde die Einhaltung aller Vorgaben und die Konformität mit dem Fabrikplanungssystem festgestellt.

5.2 Pilotanwendung in der Industrie

Der in Kapitel 1 entwickelte Prototyp wurde im Rahmen einer Pilotanwendung getestet, welche in diesem Abschnitt beschrieben wird. Die Pilotierung diente der Untersuchung der Integration von Entscheidungsträgern in den Planungsprozess und der Überprüfung der Ergebnisse der unter kontrollierten Bedingungen durchgeführten Anwendertests (Kapitel 5.1) im industriellen Umfeld. Die zu untersuchenden Ziele sind wie zuvor die Eigenschaften der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung¹² (vgl. Tabelle 5-1) sowie die allgemeinen Bewertungsbereiche eines Layoutwerkzeugs (vgl. Tabelle 5-2).

¹² Diese werden jedoch nicht wie zuvor anhand der Bewertungskriterien gemessen, sondern direkt qualitativ auf Basis der Evaluation überprüft.

Durch den Piloteinsatz soll zudem sichergestellt werden, dass PLayout aus technischer und funktionaler Sicht alle Anforderungen für den späteren Einsatz erfüllt. Daher ist bei der Durchführung auf die Erfüllung folgender fünf formale Aspekte einer Pilotanwendung zu achten [VDI 4499 Blatt 3, S. 14]:

- IT-Infrastruktur
 - Betrieb des Systems in der endgültigen Systemarchitektur
 - Test der Zusammenarbeit mit anderen Werkzeugen über Schnittstellen
- Daten
 - Arbeit mit realitätsnahen Daten in sinnvoller Größenordnung
 - Überprüfung von Datensätzen hinsichtlich Vollständigkeit und Fehlerfreiheit
- Anwender
 - Bedienung und Analyse der Anwendung durch Anwender
 - Laufende Betreuung der Anwender
 - Erhöhung der Motivation, wenn Ergebnisse produktiv genutzt werden können
- Zusammenarbeit mit Partnern
 - Test der unternehmensübergreifenden Integration
- Funktionen
 - Umfassender Test und Bewertung aller relevanten Funktionen

Die Pilotanwendung wurde gemeinsam mit einem deutschen OEM umgesetzt. Der Prototyp wurde dafür in die Daten- und Planungsumgebung des Herstellers (vgl. Kapitel 4.2.2) integriert und in verschiedenen Planungsprojekten eingesetzt. Diese umfassten mehrere Layoutworkshops in den Strukturierungsebenen General- und Gebäudestruktur (vgl. Kapitel 2.1) an verschiedenen Standorten, welche in unterschiedlicher fachlicher und hierarchischer Zusammensetzung und zum Teil auch mit direkter Vorstandseteiligung durchgeführt wurden. Vertretene Planungsbereiche waren u.a. Montageplanung, Bauplanung, Einrichtungsplanung, Elektrotechnikplanung und Infrastrukturplanung. Je nach Umfang wurde außerdem mit verschiedenen Partnerfirmen zusammengearbeitet. Zudem wurde das

Layoutwerkzeug auch für die Planung von Blocklayouts in der Bereichs- und Betriebsmittelstruktur, u.a. auch der Büroraumplanung, getestet. In einem iterativen Prozess wurden Zwischenergebnisse der Pilotanwendung in den Anforderungskatalog übernommen und flossen somit in die kontinuierliche Verbesserung des Prototyps ein (vgl. formative Evaluation: Fußnote 10, S. 119).

Die realen Planungsergebnisse der Industrieprojekte können aufgrund des Datenschutzes nicht dargestellt werden. Jedoch gilt hierfür wie auch schon zuvor dargelegt, dass der Vergleich der fabrikplanerischen Qualität nur eingeschränkte Rückschlüsse auf das genutzte Layoutwerkzeug zulassen würde, da Ziele stark unterschiedlich sein können und zudem die Bewertung von Fabriklayouts sehr komplex ist (vgl. Kapitel 5.1.4). Die folgenden Ausführungen beziehen sich daher auf die Ergebnisse der formativen Evaluation, sowie einer qualitativen Auswertung hinsichtlich der Eigenschaften der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung sowie der allgemeinen Bewertungsbereiche eines Layoutwerkzeugs (vgl. Tabelle 5-1 bzw. Tabelle 5-2). Zunächst erfolgt die Überprüfung der formalen Aspekte der Pilotanwendung (Kapitel 5.2.1) gefolgt von der Auswertung der Evaluation der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung (Kapitel 5.2.2).

5.2.1 Technische und funktionelle Überprüfung

In der Pilotanwendung konnten alle Schnittstellen des Fabrikplanungssystems genutzt werden, so dass durch eine gemeinsame Datenbasis die direkte Weiterverwendung der Daten ohne Informationsverluste oder Konvertierungen sichergestellt werden konnte. Zudem war die Arbeit mit realen Planungsdaten in entsprechenden Größenordnungen uneingeschränkt möglich. Die Aspekte **„IT-Infrastruktur“** und **„Daten“** der Pilotanwendung wurden daher beachtet und erfolgreich umgesetzt.

Das Feedback der Anwender war grundsätzlich sehr positiv, da viele Nutzer gerne eine einfache und schnelle Oberfläche zur Layoutgestaltung verwenden möchten. Die Teilnehmer in den Workshops konnten ohne vorherige Schulung direkt mit dem Layoutwerkzeug arbeiten, wobei die Ergebnisse direkt produktiv weiterverwendet werden konnten, was die Ergebnisse des Anwendertests aus Kapitel 5.1 bestätigt. In

den zahlreichen Workshops und durch die kontinuierliche Betreuung der Anwender konnten viele Ideen für die Verbesserung und Weiterentwicklung aufgenommen werden, welche jedoch aufgrund des Verzichts auf die Verwendung der MDL-Programmiersprache nicht alle umsetzbar sind und teilweise auch über das sinnvolle Maß hinausgehen. Der Einsatz des Werkzeugs erfolgte sowohl in gemeinsamen Projekten mit Partnerfirmen als auch in anderen Konzernbereichen, was die unternehmensübergreifende Integration belegt. Die Pilotanwendung wurde also hinsichtlich der Aspekte „**Anwender**“ und „**Zusammenarbeit mit Partnern**“ erfolgreich durchgeführt.

Es zeigten sich allerdings Unterschiede in der Erwartungshaltung von Studenten und beruflichen Planern gegenüber einem Layoutwerkzeug: Während die Studenten mit viel Kreativität und Experimentierfreude den Prototyp benutzten, sind im industriellen Umfeld nicht immer die Ressourcen vorhanden, um sich ausführlich mit neuen Methoden oder Werkzeugen zu beschäftigen. Jedoch konnte trotz der Einschränkungen eines Prototyps das Layoutwerkzeug produktiv genutzt werden und alle Funktionen wurden getestet und bewertet sowie bei Bedarf angepasst. Durch die formative Evaluation wurde der Umsetzungskatalog kontinuierlich angepasst bis alle relevanten Funktionen in der gewünschten Qualität im Prototyp realisiert waren. Der Aspekt „**Funktionen**“ wurde dementsprechend in der Pilotanwendung ebenfalls eingehalten.

Tabelle 5-5 fasst die formalen Aspekte der Pilotanwendung zusammen.

Tabelle 5-5: Überblick der formalen Aspekte der Pilotanwendung von PTLLayout

Aspekt	Berücksichtigt durch
IT-Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> • Erfolgreicher Betrieb des Prototyps in der späteren Systemumwelt • Erfolgreiche Überprüfung aller Schnittstellen
Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Daten in realistischen Größenordnung konnten problemlos verarbeitet werden • Datensätze vollständig und fehlerfrei
Anwender	<ul style="list-style-type: none"> • Pilotanwendung mit späteren Anwendern durchgeführt • Ergebnisse konnten produktiv genutzt werden
Zusammenarbeit mit Partnern	<ul style="list-style-type: none"> • Pilotanwendung in Projekten mit externen Partnern durchgeführt
Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> • Alle Funktionen wurden erfolgreich überprüft • Fehlende Funktionen ergänzt

Alle formalen Aspekte einer Pilotanwendung nach der *VDI 4499 Blatt 3* wurden beachtet. Es kann daher angenommen werden, dass PTLLayout aus technischer und funktionaler Sicht alle Anforderungen für den späteren Einsatz erfüllt und als Layoutwerkzeug eingesetzt werden kann.

5.2.2 Auswertung der Evaluation

Über die technische Seite hinaus wurden bei der Pilotanwendung die Eigenschaften der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung bewertet.

Es kann festgehalten werden, dass durch die Pilotanwendung des Prototyps die digitale Durchgängigkeit des Layoutwerkzeugs im Sinne der **„ganzheitlichen Daten- und Planungsumgebung“** der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung nachgewiesen werden konnte. Dies wird durch den erfolgreichen Einsatz in der IT-Infrastruktur des OEM belegt (vgl. Kapitel 5.2.1).

Hinsichtlich des Ziels der **„Einfachheit der Bedienung“** konnte durch die Pilotanwendung gezeigt werden, dass die Benutzung von PTLLayout ohne besondere Schulung möglich ist. Zu Beginn eines Workshops wurde lediglich ein kurzer Überblick über den Funktionsumfang des Systems gegeben. Dies genügte, um die Planungssitzung zu eröffnen. Meist wurde das System zu Beginn durch einen oder zwei Nutzer bedient. Dies waren meist die Organisatoren des Workshops oder die

Entscheidungsträger selbst. Die Zurückhaltung anderer Anwender legte sich nach kurzer Zeit, so dass in den Planungssitzungen alle Beteiligten das System nutzten. Eine Ausnahme bildeten dabei Sitzungen mit größeren Gruppen (weitere Ausführungen dazu siehe unten). Aufgrund der prototypischen Umsetzung gibt es bei verschiedenen Funktionen noch Verbesserungsbedarf. Diese konnten aufgrund der VBA-Sprache nicht realisiert werden (siehe vorheriges Kapitel). Die grundsätzliche Eignung dieses Planungsansatzes weist der Prototyp jedoch nach.

PTLayout konnte spontan und ohne langwierige Vorbereitung genutzt werden, wenn die Daten systemkonform vorlagen. Weitere Forderungen der **„Schnelligkeit der Planung“** (Wiederverwendung von Elementen, Einbindung von Best-practice Lösungen, schnelle und freie Übertragung von Ideen in ein Layout) wurden erreicht, so dass diese Eigenschaft der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung ebenfalls erfüllt wurde. Aufgrund der unterschiedlichen Datenlage kam es jedoch an manchen Standorten aufgrund spezifischer Ablageverfahren zu Problemen, so dass in die Vor- bzw. Nachbereitung manuell eingegriffen werden musste. Auch dieses Problem ist aufgrund der Einschränkungen des Prototyps nicht zu beheben, sollte jedoch durch eine tiefere Systemeinbindung mittels MDL behebbar sein.

Auch das übergeordnete Ziel **„Integration von Entscheidungsträgern“** konnte erreicht werden. In den Workshops waren Entscheidungsträger verschiedener Hierarchieebenen anwesend. Führungspersonen bis zum Vorstand interagierten direkt mit PTLayout, konnten ihre Ideen direkt visualisieren und in den Planungsprozess einfließen lassen. Dies führte zu einer sehr effizienten Gestaltung der Projekte, da aufwendige Änderungsschleifen vermieden wurden. Der Einsatz und die Benutzung von PTLayout wurde von den Entscheidungsträgern positiv hervorgehoben und für weitere Workshops übernommen. Jedoch war die zeitliche Verfügbarkeit von Entscheidungsträgern immer wieder ein Problem (weitere Ausführungen dazu siehe unten).

Tabelle 5-6 fasst diese Bewertungsergebnisse zusammen.

Tabelle 5-6: Bewertung des Prototyps in der Pilotanwendung

Eigenschaft	Bewertung	Erfüllungsgrad
Einfachheit der Bedienung	<ul style="list-style-type: none"> • Einfachheit der Bedienung u.a. durch Schulungsfreiheit nachgewiesen • Schnelle und spontane Nutzung • Einschränkungen der Benutzerfreundlichkeit durch Programmiersprache 	größtenteils erfüllt (Einschränkung durch Prototyp)
Schnelligkeit der Planung	<ul style="list-style-type: none"> • i.d.R. kurze Vor- und Nachbereitung • Wiederverwendung von Elementen • Einbindung von Best-practice Lösungen • schnelle und freie Übertragung von Ideen in ein Layout • Einschränkungen aufgrund nicht einheitlicher Datenlage 	größtenteils erfüllt (Einschränkung durch Prototyp)
Ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung	<ul style="list-style-type: none"> • Problemloser Einsatz in der Systemlandschaft der Automobilindustrie auf gemeinsamer Datenbasis 	vollständig erfüllt
Integration von Entscheidungsträgern	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz in Projekten mit Vorstandseteiligung • Partizipation im unmittelbaren Planungsprozess • Begrenzte zeitliche Verfügbarkeit • ggf. Auftreten hierarchischer Effekte 	größtenteils erfüllt (Einschränkungen durch organisatorische Rahmenbedingungen)

Neben der Bewertung dieser Eigenschaften, konnten durch die Pilotierung darüber hinaus einige Rahmenbedingungen abgeleitet werden, die den Einsatz der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung unterstützen. Hierbei muss beachtet werden, dass die Pilotanwendung innerhalb realer Planungsprojekte erfolgte, so dass Störfaktoren, welche beim Anwendertest ausgeschlossen werden konnten, wirksam werden konnten (vgl. etwa hierarchische Effekte bzw. gruppendynamische Prozesse, Kapitel 2.4.3 bzw. Kapitel 5.1.3).

Zum einen hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Gruppengröße zu beschränken oder ggf. größere Workshops durch einen Moderator leiten zu lassen. In Gruppen mit mehr als fünf Mitgliedern ist ohne übergeordnete Koordination gerade ein vollständig freies, kreatives Entwickeln von Layouts schwierig, da viele Ideen gleichzeitig umzusetzen sind.

Zum anderen sind Elemente in bereits existierenden Layoutdateien im Fabrikplanungssystem nicht immer einheitlich erstellt. Dadurch kann es vorkommen, dass die Touch-Bedienung des Layoutwerkzeugs nur eingeschränkt nutzbar ist, da einzelne Elemente, wie Striche oder andere Formen, nicht zu Gruppen zusammengefasst sind und somit nicht als Einheit manipuliert werden können. Die benötigten Dateien wurden daher in der Regel vor einem Workshop überprüft und ggf. für die Verwendung auf einem Touch-Display optimiert.

Vor allem gilt es jedoch die organisatorischen Rahmenbedingungen von Planungssitzungen zu überprüfen. Eine effektive Arbeit mit der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung ist nur möglich, wenn sowohl von den Entscheidungsträgern als auch von dem Planungsteam die Bereitschaft besteht, gemeinsam Konzepte zu entwickeln. Dies bedeutet, dass sich alle Beteiligten die entsprechende Zeit nehmen müssen. Dem anfangs höheren Zeitaufwand steht jedoch ein Zeitersparnis durch die bessere Abstimmung und schnellere Planung gegenüber. Ebenfalls müssen hierarchische Effekte durch eine entsprechende Unternehmenspolitik ausgeschlossen werden. Mitarbeiter, die nur versuchen den vorgelebten Normen zu entsprechen, können in dieser Umgebung sonst nicht frei und kreativ arbeiten. Grundsätzlich ist demnach neben der Verfügbarkeit der Planungshardware ein Umdenken und eine Offenheit gegenüber neuen Ansätzen notwendig, um die intuitive digitale Fabriklayoutplanung in den industriellen Alltag zu übernehmen.

Tabelle 5-7 fasst die Rahmenbedingungen der Pilotanwendung von PTLayout zusammen.

Tabelle 5-7: Prämissen für den zukünftigen Einsatz von PTLayout

Aspekt	Problem	Maßnahme
Gruppengröße	Koordination der Planung ab 5 Gruppenmitgliedern schwierig	Planung mit Moderator oder Beschränkung der Gruppengröße
Layoutdatei	Elemente in Dateien nicht einheitlich erstellt	Harmonisierung der Layouterstellung oder ggf. Überprüfung der Datei vor Workshopbeginn
Organisation	Zeitliche Verfügbarkeit Hierarchische Effekte	Offene Unternehmenskultur Konstruktiver Umgang Zeiten für Planungssitzungen fest einplanen

Als Fazit der Pilotanwendung von PTLayout kann festgehalten werden, dass ein Einsatz in der Industrie schon mit dem Prototyp möglich ist. PTLayout konnte in verschiedenen Projekten die Entwicklung von Fabriklayouts unterstützen und diente der Integration von Entscheidungsträgern in den direkten Planungsprozess. Durch die Verkürzung des Ablaufs bis zu einem abgestimmten Layout und der direkten Systemanbindung fielen die Rückmeldungen entsprechend positiv aus. PTLayout wurde in der Folge für weitere Projekte übernommen. Die umfassenden Erfahrungen ermöglichten es, Prämissen für den zukünftigen Einsatz zu formulieren, welche die Vorteile von PTLayout unterstützen.

6 Ergebnisse, kritische Reflexion und Ausblick

Dieses Kapitel dient der Auswertung der praktischen Anwendung und Bewertung. Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen werden zusammengefasst und gegenübergestellt (Kapitel 6.1). Die Ergebnisse sowie das entwickelte Konzept und die prototypische Realisierung werden in Kapitel 6.2 kritisch reflektiert. Abschließend wird ein Ausblick zu weiteren Entwicklungen und Forschungsmöglichkeiten gegeben (Kapitel 6.3).

6.1 Ergebnisse

In der Untersuchung des Konzepts und des Prototyps konnte belegt werden, dass die intuitive digitale Fabriklayoutplanung einen Beitrag zur Unterstützung früher Planungsphasen in der Automobilindustrie leisten kann. Als Grundlage dieser Beobachtung diente ein Anwendertest unter idealisierten Bedingungen, welcher durch einen Praxiseinsatz in Form einer Pilotanwendung ergänzt wurde, um ein umfassenderes Bild zu erhalten. PTLayout erfüllt alle spezifischen Bewertungskriterien (vgl. Tabelle 5-1).

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Qualität der Planung sichergestellt werden konnte, als auch eine Verringerung der Planungszeit gegenüber anderen Vorgehensweisen eingetreten ist. Die Erhöhung der Planungsqualität konnte vor allem durch eine Erhöhung der ausgeplanten Variantenanzahl und damit besseren Vergleichsmöglichkeiten erreicht werden. Zudem wird die Dokumentation und Datenkonformität der Ergebnisse stark verbessert. Der Anwendertest zeigt auch, dass das neu entwickelte Layoutwerkzeug von den Nutzern als intuitiv empfunden wird. Sowohl die Eigenschaft **„Einfachheit der Bedienung“** als auch die **„Schnelligkeit der Planung“** wurden somit erfüllt.

Der Betrieb des Layoutwerkzeugs in der **„ganzheitlichen Daten- und Planungsumgebung“** ist möglich und wird vollständig unterstützt, wie durch die Pilotanwendung nachgewiesen werden konnte. Gleichzeitig konnte durch den Anwendertest belegt werden, dass auch ohne vorherige Schulung eine systemkonforme Erstellung von Layoutdateien sowie eine korrekte Dokumentation möglich ist.

Diese drei wesentlichen Eigenschaften der intuitiven digitalen Layoutplanung korrelieren demnach mit dem übergeordneten Ziel der **Integration von Entscheidungsträgern**. Diese wurde in der Pilotwendung mehrfach erfolgreich durchgeführt. Es kann somit gefolgert werden, dass das entwickelte Konzept und die prototypische Realisierung eine Lösung für das eingangs formulierte Problem darstellen.

Die Bewertung wurde in mehreren Untersuchungen vorgenommen. Der Gruppentest (vgl. Kapitel 5.1.2) diente der Überprüfung der „Einfachheit der Bedienung“, der Vergleichstest (vgl. Kapitel 5.1.3) der Überprüfung der „Schnelligkeit der Planung“. Beide Eigenschaften wurden zudem auch in der Pilotanwendung durch den Aspekt der Intuitivität untersucht. Die „ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung“ wird durch den Betrieb von PTLAYOUT in der späteren Systemumgebung im Rahmen der Pilotanwendung (vgl. Kapitel 5.2) nachgewiesen. **Tabelle 6-1** gibt einen Überblick jeweiligen Untersuchungen.

Tabelle 6-1: Überblick der Untersuchungen der Eigenschaften der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung

Eigenschaft	Untersuchung durch
Einfachheit der Bedienung	Überprüfung durch den Gruppentest (Kapitel 5.1.2) Bestätigt durch die Pilotanwendung (Kapitel 5.2)
Schnelligkeit der Planung	Überprüfung durch den Vergleichstest (Kapitel 5.1.3) Bestätigt durch die Pilotanwendung (Kapitel 5.2)
Ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung	Überprüfung durch die Pilotanwendung (Kapitel 5.2)

Durch die Kombination mehrerer Untersuchungsmethoden ist sichergestellt, dass sich die erhobenen Ergebnisse auf die jeweils untersuchte Eigenschaft beziehen und Störgrößen ausgeschlossen werden können. Es können somit detaillierte Aussagen zu einzelnen Eigenschaften der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung getroffen werden. Die Ergebnisse der unter Idealbedingungen durchgeführten Anwendertests werden durch die Pilotwendung bestätigt. Dadurch ist gewährleistet, dass die Ergebnisse in den industriellen Einsatz übertragbar sind. Gleichzeitig konnte dadurch die ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung nachgewiesen werden.

Die Bewertung des Layoutwerkzeugs hinsichtlich der allgemeinen Bewertungsbereiche nach *Shariatzadeh et al.* (vgl. Tabelle 5-2) fällt ebenfalls positiv aus.

Für die **Layouterstellung** waren alle benötigten Werkzeuge und Ansichten verfügbar. Dies wurde sichergestellt, indem die Ergebnisse der Untersuchungen durch die formative Evaluation fortwährend in die Entwicklung eingeflossen sind. Zudem war sowohl die Arbeit mit 2D als auch mit 3D-Layouts möglich.

Die Bereiche **Koordination verschiedener Layouts** und **Änderungsmanagement** sind durch die Nutzung des dem Prototypen zugrundeliegenden Fabrikplanungssystems voll erfüllt. Datenmanagement, Variantenbildung, Versionierung, die Unterstützung eines Freigabeprozesses sowie die Verwendung von Referenzen und Teilergebnissen entsprechen den hohen Ansprüchen der Automobilindustrie.

Für die **Verifikation eines Layouts** wurde eine Kollisionsprüfung in den Prototypen integriert, die den Planer in die Lage versetzt, Überschneidungen von Elementen schnell zu erkennen und zu beheben. Die Prüfung von gesetzlichen Vorgaben ist für ein Fabriklayout sehr komplex und kann nicht vollständig automatisiert erfolgen, da sich die Vorgaben regional erheblich unterscheiden können. Die Einhaltung häufig festgelegter Eigenschaften, wie Abstände von Gebäuden oder den Anteil der bebaubaren Fläche eines Grundstücks, wird jedoch etwa durch die Bemaßungsfunktion oder die Flächenauswertung unterstützt.

Effizienz, Gebrauchstauglichkeit und Erweiterungsfähigkeit wurden durch die Pilotanwendung nachgewiesen. Reale Planungsdaten in üblicher industrieller Größenordnung konnten ohne Probleme verarbeitet werden. Die Gebrauchstauglichkeit des Prototyps belegt der Gruppentest. Aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Möglichkeiten ist die Erweiterungsfähigkeit gegeben.

6.2 Kritische Reflexion

Wie die Ergebnisdarstellung im vorherigen Kapitel zeigt, konnte die anfangs formulierte Leitfrage nach der Gestaltung eines Layoutwerkzeugs zur Entwicklung

zukünftiger Fabriklayouts beantwortet werden. Auf Basis der erarbeiteten Anforderungen wurde ein Konzept entwickelt, welches es ermöglicht, Entscheidungsträger in den unmittelbaren Planungsprozess zu integrieren und somit neue, kreative Konzepte zu erarbeiten und den Abstimmungsprozess zu verkürzen. Die in Kapitel 2.6 formulierte Diskrepanz zwischen der Intuitivität und der digitalen Durchgängigkeit eines Werkzeugs konnte aufgelöst werden.

Jedoch konnten mit dem Prototyp nicht alle Layoutdaten des genutzten Fabrikplanungssystems unmittelbar verwendet werden, wie die Pilotanwendung gezeigt hat. Bei der Erstellung der Dateien werden je nach Nutzer einzelne Elemente unterschiedlich oder auch gar nicht zusammengefasst und gruppiert, weshalb diese nicht immer durch die Touch-Bedienung zu handhaben sind. Die Daten müssen dadurch vor der Verwendung überprüft werden, was aber auch bei anderen Methoden oder Werkzeugen Teil der Vorbereitung ist. Um hier Abhilfe zu schaffen, wäre es notwendig, die Layouterstellung noch mehr zu harmonisieren und auf die Weiterverwendung mit Touch-Displays auszurichten.

Der Praxiseinsatz zeigte ferner weitere Einsatzmöglichkeiten des Layoutwerkzeugs auf anderen Strukturierungsebenen, wie etwa der Büroraumplanung. Um dazu verlässliche Aussagen zum Einsatzpotential treffen zu können, sind weitere Untersuchungen mit anderen Anwendungsbeispielen oder in entsprechenden Industrieprojekten notwendig. Hierbei sind u.a. die benötigten Funktionen abzu prüfen und ggf. im Layoutwerkzeug zu ergänzen.

Bei der Erweiterung des Werkzeugs ist abzuwägen zwischen dem Funktionsumfang und der Intuitivität. Wie die Auswertung des Anwendertests im Wintersemester 2018/19 gezeigt hat, kann eine Vergrößerung der Leistungsfähigkeit auch einen Anstieg der vom Nutzer empfundenen Notwendigkeit einer Schulung verursachen. Bei der Gestaltung und Weiterentwicklung eines Werkzeugs zur intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung ist daher darauf zu achten, nur relevante Funktionen aufzunehmen. Ergänzende Programmiererweiterungen sollten im Grundsystem realisiert werden, um die Intuitivität nicht negativ zu beeinflussen.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit befindet sich der VDA in der Vorbereitung der Umstellung auf eine neue Version des Fabrikplanungssystems. Vor einem produktiven Einsatz ist zu prüfen, inwieweit der entwickelte Prototyp kompatibel mit der zukünftigen Software ist. Gegebenenfalls können verschiedene Funktionen mit der neuen Version einfacher oder auch noch intuitiver umgesetzt werden. Obwohl die grundsätzliche Gestaltung der Benutzeroberfläche nach der ISO 9241-Reihe (Ergonomie der Mensch-System-Interaktion) erfolgte, sollte in diesem Zuge auch eine Überprüfung und Überarbeitung der Benutzeroberfläche erfolgen. Bereiche wie die Gestaltung von Piktogrammen oder andere Elemente angrenzender Wissenschaften bieten das Potential die Intuitivität weiter zu erhöhen, konnten jedoch im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht näher betrachtet werden.

Weiterhin erfolgte die Realisierung von PTLayout in VBA. Wie diskutiert ist diese Programmiersprache für den Prototyp ein guter Kompromiss zwischen den Gestaltungsmöglichkeiten und dem Programmieraufwand. Gleichzeitig bietet dies die Chance, PTLayout für das Autodesk-Fabrikplanungssystem nutzbar zu machen. Die Portierung und der Test innerhalb dieses Systems würde weitere Rückschlüsse auf die Einsatzmöglichkeiten der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung ermöglichen. Aufgrund von Zeitgründen konnten diese Versuche allerdings nicht mehr umgesetzt werden, so dass sich die vorliegende Arbeit auf das im VDA verbreitetere Bentley-System beschränkt. Für eine finale Version ist jedoch eine Umsetzung in der jeweiligen, nativen Sprache (MDL bzw. AutoLISP) anzustreben. In diesen wären auch bisher nicht umgesetzte Funktionen zusätzlich realisierbar, da sie weitreichendere Möglichkeiten bieten. Auch sind dadurch positive Effekte auf die Benutzerführung und die Performanz des Layoutwerkzeugs anzunehmen.

Mit der wesentlichste Punkt, welchen es beim Einsatz der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung zu berücksichtigen gilt, ist die Schaffung der entsprechenden organisatorischen Voraussetzungen. Entscheidungsträger müssen der Einbindung offen gegenüberstehen. Nur durch ihre Bereitschaft können die Vorteile der Planungsmethode realisiert werden. Gleichzeitig ist auch ein Umdenken im Planungsteam notwendig. Effekte durch die Anwesenheit von Führungskräften, wie

das Festhalten an bekannten Strukturen, um der Unternehmenspolitik oder der durch hierarchische Strukturen vorgelebten Normenordnung zu entsprechen, müssen aktiv durch eine offene und konstruktive Unternehmenspolitik unterbunden oder zumindest abgeschwächt werden. Auch müssen Entscheidungsträger und Planungsteam den früheren höheren Zeitaufwand mittragen. Im Sinne des Frontloadings wirkt sich dieser auf spätere Phasen positiv aus, wird jedoch aufgrund der oft starken Fokussierung auf den eigenen Arbeitsbereich ggf. nicht als gewinnbringend wahrgenommen.

Obwohl sich weiteres Potential des Prototyps gezeigt hat, kann insgesamt festgehalten werden, dass die zu Beginn gesetzten Ziele erreicht wurden. Es wurde zur Fabriklayoutplanung ein Konzept für ein intuitives digitales Werkzeug entwickelt, welches prototypisch realisiert und bewertet wurde. Die zuvor festgelegten Eigenschaften konnten dabei nachgewiesen werden. Durch die hohe Anzahl von Anwendern, die lange Pilotierung und die kontinuierliche Anpassung konnte außerdem sichergestellt werden, dass die Ergebnisse robust sind und nicht von einzelnen Faktoren abhängen.

6.3 Ausblick

Hinsichtlich weiterer Forschung erstrecken sich weitere Potentiale auf die Ausweitung des Einsatzes des Konzepts. So wurde im Zuge der Pilotanwendung entdeckt, dass das Konzept der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung nicht nur für die Entwicklung von Fabriklayouts nützlich ist, sondern auch bei der Gestaltung von Layouts auf niedrigeren Strukturierungsebenen unterstützen kann. Da die in der Automobilindustrie eingesetzten Fabrikplanungssysteme für die Layoutplanung in allen Strukturierungsebenen, von dem Fabriklayout bis zur Büroraumplanung, eingesetzt werden, ist es sehr vielversprechend, auch den vorgestellten Prototyp diesbezüglich weiterzuentwickeln. An dieser Stelle sind weitere Forschungsarbeiten angebracht, um das Potential und die ggf. notwendigen Anpassungen beurteilen zu können.

In einem nächsten Schritt wäre zu prüfen, ob eine Erweiterung des Konzepts zur intuitiven digitalen Fabrikplanung möglich und sinnvoll ist. Dies würde bedeuten,

weitere Systeme mit entsprechenden Benutzeroberflächen auszustatten, so dass Planungsaufgaben aus anderen Gewerken, wie beispielsweise der Montage, ebenfalls von der Einbindung von Entscheidungsträgern und der erhöhten digitalen Durchgängigkeit profitieren könnten. Gleichzeitig sollte angestrebt werden, eine engere Verbindung zwischen den einzelnen Teilsystemen eines Fabrikplanungssystems umzusetzen. So könnte etwa durch die Verknüpfung der CAD-Layoutplanung und der Materialflusssimulation schon während einer Planungssitzung ein Produktionslayout simulativ abgesichert werden. Weitere Potentiale liegen in der Verzahnung der CAD-Fabriklayoutplanung und der Bauplanung. Durch eine engere Abstimmung könnte die BIM-Methodik bereits während der frühen Phase der Layoutplanung gezielt vorbereitet werden.

Perspektivisch wäre es auch denkbar, die in dieser Arbeit entwickelte Planungsmethode mit der „Fabrikplanung 5.0“ zu verbinden. Dieser innovative Ansatz von *Bracht et al.* überträgt den Fabrikplanungsprozess komplett in die virtuelle Welt und bietet somit erstmals die Möglichkeit, gesamtheitlich Fabriken und Anlagen in einem System zu konzipieren, zu gestalten und zu simulieren [Bracht et al. 2019]. Durch diesen Ansatz wird die digitale Durchgängigkeit innerhalb des VR-Systems umgesetzt. Jedoch ist zu prüfen, ob die Anbindung an die Systeme der Automobilindustrie realisierbar ist. Durch die sehr spezifisch formulierten Anforderungen sind die Hürden für einen reibungslosen Betrieb in dieser Umgebung sehr hoch. Vorteile würde die Verbindung der Ansätze vor allem hinsichtlich der immer globaleren Planung bringen. Da Fabriklayouts weltweit mit internationalen Teams entwickelt werden, ist es zunehmend notwendig über große Entfernungen zusammenzuarbeiten. Ein virtueller Projektraum mit Planungstisch ist dazu ein möglicher Ansatz.

7 Zusammenfassung

Die aktuelle Situation in der Automobilbranche ist geprägt von disruptiven Umbrüchen, vor allem im Bereich der Antriebstechnologien. Die Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Marktentwicklungen zwingen die Hersteller, ihre Fabrikstrukturen nicht nur im Hinblick auf die Fahrzeugmodelle der nächsten Generation anzupassen, sondern auch wandlungsfähiger als je zuvor zu gestalten, um so auf die immer kürzer werdenden Innovationszyklen reagieren zu können. Hierbei ist es insbesondere die frühe Phase der Fabriklayoutplanung, in welcher die benötigten neuen Ideen entwickelt und strukturiert werden müssen.

Durch die strategische Dimension dieser Planungen müssen Entscheidungsträger in den unmittelbaren Planungsprozess einbezogen werden, um ihr Wissen und ihr strategisches Denken bestmöglich zu nutzen. Dazu ist es notwendig, eine Möglichkeit zu schaffen, wie unterschiedliche Planungsbeteiligte schnell und intuitiv eingebunden werden können.

Die Gestaltung von wandlungsfähigen Fabriklayouts erfolgt dabei nach der Methode des Szenario-Managements, d.h. es werden zu möglichst vielen Zukunftsbildern entsprechende Layoutvarianten entwickelt und aus diesen eine Gesamtlösung abgeleitet. Aufgrund der komplexen und aufwendigen Planungsaufgabe ist dazu ein digitales Werkzeug mit umfangreichen Funktionalitäten notwendig. Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit ein Werkzeug zur intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung entwickelt und prototypisch umgesetzt.

Zunächst erfolgt die Darstellung der relevanten Grundlagen mit Fokus auf die Fabriklayoutplanung und die Digitale Fabrik. Zudem erfolgt die Untersuchung und Ableitung der Definition einer intuitiven Planung. Auf dieser Basis werden verschiedene Methoden und Werkzeuge der Layoutplanung analysiert.

Um die im Untersuchungsbedarf beschriebene Lücke zwischen der Intuitivität und der digitalen Durchgängigkeit eines Layoutwerkzeugs zu schließen, wird anschließend die intuitive digitale Fabriklayoutplanung hergeleitet und wesentliche

Eigenschaften beschrieben. Es schließt sich eine Beschreibung des Anwendungsbereichs und die Ableitung von Anforderungen an das zu entwickelnde Layoutwerkzeug an.

Aufgrund dieser Anforderungen erfolgt die Formulierung eines konkreten Umsetzungskatalogs für einen Prototyp, welcher durch den Autor programmiert und in das Systemumfeld eines Automobilherstellers integriert wird.

Durch die praktischen Anwendungen werden Konzept und Prototyp umfassend erprobt: Es wurden dazu mehrere Anwendertests durchgeführt, welche die Interaktion der Nutzer mit dem entwickelten Layoutwerkzeug bewerten. Diese Tests umfassen zudem auch einen Vergleich mit anderen Methoden und Werkzeugen. Hierzu wurde auf Grundlage realer Automobilwerke ein Anwendungsbeispiel entwickelt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Weiterhin wurde der Prototyp bei einem deutschen OEM pilotiert und das Layoutwerkzeug somit in der Industrie eingesetzt. PTLayout wurde dabei erfolgreich in Industrieprojekten verschiedener Größenordnung mit unterschiedlichen Entscheidungsträgern (zum Teil mit direkter Vorstandseteiligung) im unmittelbaren Planungsprozess verwendet.

Die Auswertung der Untersuchungen ergab, dass die intuitive digitale Fabriklayoutplanung einen wesentlichen Beitrag zur Planung in der frühen Phase leisten kann. Die im Konzept beschriebenen Eigenschaften (Einfachheit der Bedienung, Schnelligkeit der Planung sowie die Eignung zur Integration in eine ganzheitliche Daten- und Planungsumgebung) konnten durch den Prototyp nachgewiesen werden. Dies wird belegt durch den erfolgreichen Industrieinsatz. Vor allem die Möglichkeit Entscheidungsträger direkt in den Planungsprozess zu integrieren, unterstützt die Entwicklung zukunftsgerechter Lösungen in dem disruptiven Umfeld der Automobilindustrie. Im Zuge der kritischen Reflexion wird das Vorgehen rückblickend bewertet und ein Ausblick zu weiteren Forschungsmöglichkeiten gegeben.

All diese Maßnahmen dienen der Verbesserung der Planung von Fabrikstrukturen im Automobilbau. Diese muss in der Zukunft schneller, durchgängiger und mit direkter Einbindung von Entscheidungsträgern durchgeführt werden, um wandlungsfähige Automobilwerke optimal gestalten zu können.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die entwickelte intuitive digitale Fabriklayoutplanung über Fach- und Organisationsgrenzen hinweg einen wesentlichen Teil zur Planung und Sicherstellung von erfolgreichen Automobilproduktionen für die nächsten Jahrzehnte leisten kann.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Drei Szenarien zur Entwicklung des Produktionsanteils von Elektrofahrzeugen in Deutschland bis 2030 [nach Bauer et al. 2018, S. 35-37]	3
Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit	9
Abbildung 2-1: Zusammenhang zwischen Produkt-, Technologie- und Gebäudelebenszyklus [nach Schenk et al. 2014, S. 148]	15
Abbildung 2-2: Kooperation und Kollaboration im Vergleich	16
Abbildung 2-3: Zusammenhang von Wandlungsfähigkeit und Flexibilität [nach Zäh et al. 2005, S. 78; Reinhart et al. 2008, S. 47-51; Wiendahl et al. 2014, S. 129]	19
Abbildung 2-4: Wandlungsobjekte der Strukturierungsebene „Generalstruktur“ [in Anlehnung an Hernández 2003, S. 67]	20
Abbildung 2-5: Übersicht Fabrikplanungssystematiken [in Anlehnung an Aurich et al. 2015, S. 192; Schuh et al. 2007, S. 196; VDI 5200 Blatt 1, S. 8-21; Wiendahl 1996, S. 9-11; Grundig 2018, S. 46; Kettner et al. 1984, S. 13; Pawellek 2014, S. 62]	23
Abbildung 2-6: Prinzip der Parallelisierung	24
Abbildung 2-7: Einordnung der Layoutplanung in die Fabrikplanungsphasen [nach VDI 5200 Blatt 1, S. 12-16]	26
Abbildung 2-8: Typen von Layouts, eingeteilt nach Planungsphase und –ebene [in Anlehnung an Kettner et al. 1984, S. 126; Wiendahl et al. 2001, S. 189; Hernández 2003, S. 68; Grundig 2018, S. 143]	27
Abbildung 2-9: Generalstruktur am Beispiel eines Automobilwerks	29
Abbildung 2-10: Ideales Funktionsschema eines Automobilwerks	30
Abbildung 2-11: Flächenmaßstäbliches Funktionsschema eines Automobilwerks	30
Abbildung 2-12: Beispiel für ein ideales Blocklayout eines Automobilwerks [in Anlehnung an Maurer und Stark 2001, S. 11]	31
Abbildung 2-13: Fokus der Digitalen Fabrik [nach VDI 4499 Blatt 1, S. 3]	36
Abbildung 2-14: Nutzung digitaler Modelle für die Planungsstationen im Industriebau [Bracht et al. 2018, S. 260]	40
Abbildung 2-15: 3D-Modell einer Generalbebauungsplanung zur VR-Darstellung	41
Abbildung 2-16: Partizipation von Entscheidern und operativen Mitarbeitern nach Planungsfortschritt und -ebene	48
Abbildung 2-17: BUILD-IT Planungstisch [Quelle: IMAB]	53
Abbildung 2-18: 3P-Workshop [VW AG 2007]	55

Abbildung 2-19: Einsatz von digitalen Werkzeugen und Methoden für die Fabrikplanung [Schäfer und Bracht 2018, S. 612]	57
Abbildung 2-20: Intuitive digitale Fabriklayoutplanung als Antwort auf die disruptiven Umbrüche in der Automobilindustrie [in Anlehnung an Schäfer und Bracht 2018, S. 613]	59
Abbildung 2-21: Portfolioanalyse betrachteter Klassen von Methoden und Werkzeugen bezüglich der Erfüllungsgrade der Intuitivität und digitaler Durchgängigkeit für die Layoutplanung in der frühen Phase	60
Abbildung 3-1: Herleitung der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung	63
Abbildung 3-2: Forderungen zur "Einfachheit der Bedienung"	65
Abbildung 3-3: Forderungen zur "Schnelligkeit der Planung"	67
Abbildung 3-4: Forderungen zur "ganzheitlichen Daten- und Planungsumgebung"	68
Abbildung 3-5: Zentrale Eigenschaften intuitiver digitaler Fabriklayoutplanung [in Anlehnung an Schäfer und Bracht 2018, S. 614]	69
Abbildung 3-6: Ablauf intuitive digitale Fabriklayoutplanung [in Anlehnung an Schäfer und Bracht 2018, S. 614]	71
Abbildung 3-7: Kamm-Konzept der Montagehalle des BMW Werks Leipzig [nach Bauer 2006, S. 184]	74
Abbildung 3-8: BMW Werk Leipzig [Quelle: BMW AG]	74
Abbildung 3-9: Plus-Konzept der Endmontage des Smart Werks Hambach [in Anlehnung an Daimler AG 2018b]	75
Abbildung 3-10: Smart Werk Hambach [Quelle: Daimler AG]	75
Abbildung 3-11: Opel Werk Rüsselsheim [Quelle: Opel]	76
Abbildung 3-12: Grundlegende Materialflussstruktur in Abhängigkeit von Fixpunkten [in Anlehnung an Erlach 2017, S. 12]	79
Abbildung 3-13: Führung des Hauptmaterialflusses und Positionierung der Fixpunkte im Fabriklayout [in Anlehnung an Bischoff 2016, S. 23]	80
Abbildung 3-14: Flexible Logistikhalle "Flex-Hub" (Computergrafik) [Quelle: BMW AG] / [Dobos 2017, S. 47]	82
Abbildung 4-1: Systematisches Flächenplanungssystem (SFPS) mit den für die Fabriklayoutplanung relevanten Flächentypen (blau) [in Anlehnung an VDI 3644, S. 7]	99
Abbildung 4-2: Neuentwickeltes Bildschirmmenu von PTLayout	106

Abbildung 4-3: Übersicht der in PTLayout eingebundenen Programmteile und neuentwickelten Funktionen.....	108
Abbildung 4-4: Alle Werkzeuggesten von PTLayout in der Übersicht	109
Abbildung 4-5: Erweiterung einer Konfigurationsvariablen.....	110
Abbildung 4-6: Menüeintrag PTLayout	111
Abbildung 4-7: Konfiguration des Menüeintrags	111
Abbildung 4-8: Aufbau eines Bentley-Fabrikplanungssystems [in Anlehnung an König 2013, S. 48]	112
Abbildung 4-9: Benutzeroberfläche Bentley ProjectWise v8i SS4 [vgl. Bentley Systems 2015, S. 3].....	113
Abbildung 4-10: Kommunikation zwischen Server und Client im Fabrikplanungssystem	114
Abbildung 4-11: Anhängen des Konfigurationsblocks von PTLayout an eine Layoutdatei.....	115
Abbildung 4-12: Planungstisch für die Pilotanwendung von PTLayout [Quelle: eKiosk 2019]	116
Abbildung 5-1: Volkswagen Werk Chattanooga [Quelle: Volkswagen AG]	120
Abbildung 5-2: Fabriklayout und Erweiterungskonzept der Volkswagen Standardfabrik [Bischoff 2016, S. 22]	121
Abbildung 5-3: Satellitenbild des Volkswagen Werks Chattanooga [Quelle: Google Maps]	121
Abbildung 5-4: Umfang der Aufgabenstellung in den Fabrikplanungsphasen nach VDI 5200 Blatt 1.....	124
Abbildung 5-5: Zustimmungswerte der Anwender zu Aussagen über verschiedene Planungssysteme im WS 2017/18 [Schäfer und Bracht 2018, S. 615]	126
Abbildung 5-6: Zustimmungswerte der Anwender zu Aussagen über verschiedene Planungssysteme im WS 2018/19	127
Abbildung 5-7: Zeitbedarf der Planungsmethoden/-werkzeuge.....	129
Abbildung 5-8: Layoutplanung mit einem Papierschiebelayout und Nachzeichnen am PC	129
Abbildung 5-9: Layoutplanung am Touch-Display mit PTLayout (links) und visTable (rechts)	130
Abbildung 5-10: Erste grobe Anordnung der Bereiche	132
Abbildung 5-11: Zwischenschritt der Entwicklung des Fabriklayouts	132
Abbildung 5-12: Endergebnis des Fabriklayouts	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Strukturierungs- und Planungsebenen der Fabrik [nach Eversheim und Schuh 1996, S. 9-67; VDI 5200 Blatt 1, S. 7].....	12
Tabelle 2-2:	Detaillierungsstufen der 3D-CAD-Layoutplanung [in Anlehnung an Knobel et al. 2004, S. 218]	41
Tabelle 4-1:	Übersicht der Funktionen zur Layoutmanipulation	96
Tabelle 4-2:	Übersicht der Funktionen der Bausteinbibliothek.....	97
Tabelle 4-3:	Übersicht der Funktionen der Kollisionskontrolle	98
Tabelle 4-4:	Übersicht der Funktionen der Flächenauswertung	100
Tabelle 4-5:	Übersicht der Möglichkeiten der Integration des Layoutwerkzeugs in ein Fabrikplanungssystem [in Anlehnung an Claus und Schwill 2006, S. 511].....	101
Tabelle 4-6:	Übersicht der Funktionen zur Dokumentation	103
Tabelle 4-7:	Vergleich der Fabrikplanungssysteme der deutschen Automobilhersteller	104
Tabelle 5-1:	Spezifische Bewertungskriterien für PTLAYOUT	118
Tabelle 5-2:	Allgemeine Bewertungsbereiche eines Layoutwerkzeugs [in Anlehnung an Shariatzadeh et al. 2012, S. 300-304]	118
Tabelle 5-3:	Vorgaben zur Dimensionierung der Bereiche.....	123
Tabelle 5-4:	Vorgaben Raster der Produktionsbereiche	123
Tabelle 5-5:	Überblick der formalen Aspekte der Pilotanwendung von PTLAYOUT	137
Tabelle 5-6:	Bewertung des Prototyps in der Pilotanwendung	139
Tabelle 5-7:	Prämissen für den zukünftigen Einsatz von PTLAYOUT	141
Tabelle 6-1:	Überblick der Untersuchungen der Eigenschaften der intuitiven digitalen Fabriklayoutplanung	144

Literaturverzeichnis

- Abele, Eberhard; Bauerdick, Christoph J.H.; Strobel, Nina; Panten, Niklas (2016):** ETA Learning Factory. A Holistic Concept for Teaching Energy Efficiency in Production. In: *Procedia CIRP* 54, S. 83-88.
- Ackermann, Jörg; Börner, Frank; Müller, Egon (2017):** Hybride Fabrikplanung. Symbiotische Planung mit physischen und digitalen Fabrikmodellen. In: *Werkstattstechnik online* 107 (4), S. 225-230.
- Ackermann, Jörg und Börner, Frank (2016):** Hybride Fabrikplanung. In: Egon Müller (Hg.): *Smarte Fabrik & Smarte Arbeit. Industrie 4.0 gewinnt Kontur.* Tagungsband. VPP 2016 - Vernetzt planen und produzieren. Chemnitz, 21.10.2016. TU Chemnitz (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Sonderheft 22), S. 207-216.
- ADB (VDI-Gesellschaft Produktionstechnik) (Hg.) (1992):** Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Aggteleky, Béla (1987):** Fabrikplanung. Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung. Bd. 1: Grundlagen, Zielplanung, Vorarbeiten, Unternehmerische und systemtechnische Aspekte, Marketing und Fabrikplanung. 2., durchgesehene Auflage. München: Carl Hanser Verlag.
- Aggteleky, Béla (1990):** Fabrikplanung. Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung. Bd. 3: Ausführungsplanung und Projektmanagement, Planungstechnik in der Realisationsphase. München: Carl Hanser Verlag.
- Arnold, Hansjörg; Kuhnert, Felix; Kurtz, Ralf; Bauer, Wilhelm (2010):** Elektromobilität. Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand. Studie. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO); PricewaterhouseCoopers (PwC).
- Aurich, Jan C.; Steinmer, Chantal; Meissner, Hermann; Menck, Nicole (2015):** Einfluss von Industrie 4.0 auf die Fabrikplanung. Auswirkungen der besonderen Charakteristika cybertronischer Produktionssysteme auf die Fabrikplanung. In: *Werkstattstechnik online* 105 (4), S. 190-194.
- Aurich, Paul; Stonis, Malte; Nyhuis, Peter (2018):** Entwicklung einer Methode zur quantitativen, mehrdimensionalen Fabriklayoutplanung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (3), S. 117-120.
- Aurich, Ralf und Jäger, Fabian (2014):** Partizipative Layoutplanung als Erfolgsfaktor in der Praxis. Fabrik als "Zuhause des Unternehmens" erfordert aktive Mitgestaltung. In: *VDI-Z Integrierte Produktion* 156 (1/2), S. 94-95.

- Bauer, Nikolaus (2006):** Intralogistische Konzepte und ausgewählte technische Lösungen im BMW Werk Leipzig. In: Dieter Arnold (Hg.): Intralogistik. Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH (VDI-Buch), 182-191.
- Bauer, Wilhelm; Riedel, Oliver; Herrmann, Florian; Borrmann, Daniel; Sachs, Carolina; Schmid, Stephan; Klötzke, Matthias (2018):** Elektromobilität und Beschäftigung. Wirkungen der Fahrzeugelektrifizierung auf die Beschäftigung am Standort Deutschland (ELAB 2.0). Studie. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO).
- Bauernhansl, Thomas (2016):** Weckruf für Unternehmen. Warum wir ein einheitliches Verständnis für Industrie 4.0 brauchen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (7-8), S. 453-457.
- Bauernhansl, Thomas; Krüger, Jörg; Reinhart, Gunther; Schuh, Günther (2016):** WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Hg. v. Eberhard Abele. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e.V.
- Bentley Systems (Bentley Systems, Incorporated) (Hg.) (2015):** ProjectWise Explorer v8i. User Manual. Michael Baker International. Online verfügbar unter http://www.bakerprojects.com/ProjectWise/attachments/ProjectWise_Explorer_V8i_User_Manual.pdf, zuletzt geprüft am 28.05.2019.
- Berggren, Christian (1993):** The Volvo Uddevalla Plant. In: *Journal of Industry Studies* 1 (1), S. 75-87.
- Berlin, Claas und Beutnagel, Werner (2019):** Jungbrunnen. IT-Transformation bei Volkswagen. In: *automotiveIT* (2).
- Billinghurst, Mark; Kato, Hirokazu; Poupyrev, Ivan (2008):** Tangible Augmented Reality. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/228344366_Tangible_augmented_reality, zuletzt geprüft am 05.09.2018.
- Billinghurst, Mark; Kato, Hirokazu; Poupyrev, Ivan (2018):** Collaboration with tangible augmented reality interfaces. Online verfügbar unter <https://www.researchgate.net/publication/249706042/>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Bischoff, Jürgen (2011):** Die sieben Rollen des Fabrikplaners. Ein Plädoyer für Fabrikplanung "mit Leidenschaft". In: *VDI-Z Integrierte Produktion* 153 (11/12), S. 74-75.
- Bischoff, Jürgen (2016):** Fabriken im Wandel. Gestaltungsprinzipien der Veränderungsfähigkeit und ihre Vorteile für Produktionsunternehmen. Fachbeirat des Deutschen Fachkongress Fabrikplanung.
- Bley, Helmut; Fritz, Jürgen; Zenner, Christian (2006):** Die zwei Seiten der Digitalen Fabrik. Software-Werkzeuge und Methode. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 101 (1-2), S. 19-23.

- Borchers, Jan; Corsten, Christian; Möllers, Max; Völker, Simon (2013):** Von der Fläche zur Kurve. Multi-Touch auf beliebigen Oberflächen und Objekten. In: Thomas Schlegel (Hg.): Multi-Touch. Interaktion durch Berührung, Teil IV. Berlin: Springer Vieweg (Xpert.press), S. 369-391.
- Bracht, Uwe; Brosch, Patrick; Fleischmann, Anna-Charlotte (2013a):** Mobile devices and applications for factory planning and operation. In: Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque und Alexander Klaas (Hg.): Simulation in Produktion und Logistik. Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung. Zugl. ASIM-Mitteilung Nr. AM 147. 15. ASIM Fachtagung. Paderborn, 09. bis 11. Oktober 2013 (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 316), S. 61-70.
- Bracht, Uwe; Brosch, Patrick; Fleischmann, Anna-Charlotte (2013b):** Neue Perspektiven in der Digitalen Fabrik. In: *Economic Engineering* (6), S. 22-26.
- Bracht, Uwe; Brosch, Patrick; Sontag, Till (2010):** Mobile Anwendungen im Rahmen der Digitalen Fabrik. Analyse der Einsatzmöglichkeiten von Smartphones und Tablet-PCs 102 (3), S. 98-102.
- Bracht, Uwe; Eckert, Clemens; Masurat, Thomas (2005a):** Ein umfassender Ansatz für Planung und Betrieb. Ursprünge und Visionen der Digitalen Fabrik. In: *Intelligenter produzieren* (1), S. 8-10.
- Bracht, Uwe; Fischer, Anja; Krüger, Thomas (2017):** Mathematische Anordnungsoptimierung und Simulation. Ein kombinierter Ansatz zur Fabriklayoutplanung. In: *Werkstattstechnik online* 107 (4), S. 200-206.
- Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid (2018):** Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Basis für Industrie 4.0. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- Bracht, Uwe; Gorke, Nils Thorben; Spies, Jan (2015):** Vernetzung eines virtuellen Projektraums mit dem Fabrik-DMU der Fabrikstrukturplanung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (10), S. 639-642.
- Bracht, Uwe; König, Alexander; Spies, Jan (2012):** Integration des Fabrik-DMU in die Planungsprozesse der Fabrikstrukturplanung. Elemente für das Erstellen von gewerke-übergreifenden virtuellen Gesamtfabrikmodellen. In: *Werkstattstechnik online* 102 (3), S. 103-108.
- Bracht, Uwe; Schlange, Christian; Eckert, Clemens; Masurat, Thomas (2005b):** Datenmanagement für die Digitale Fabrik. Forschungsorientierter Modellansatz für ein effektives Datenmanagement im heterogenen Planungsumfeld. In: *Werkstattstechnik online* 95 (4), S. 197-204.
- Bracht, Uwe; Schlegel, Marc; Özkul, Felix (2019):** Fabrikplanung 5.0. Komplette virtuell zum Ziel. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (4), S. 208-212.

- Bracht, Uwe und Fahlbusch, Martin W. (2001):** Fabrikplanung mit Virtual Reality. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 96 (1-2), S. 20-26.
- Bracht, Uwe und Hinrichs-Stark, Wilko (2015):** Kollaboration in logistischen Lieferketten. Mobiles Logistikmanagement mit Social Media. In: *Werkstattstechnik online* 105 (11/12), S. 849-855.
- Bracht, Uwe und Reichert, Johannes (2010):** Digitale Fabrik - auch KMU sind aufgefordert künftig ihre Fabriken in 3D-CAD zu planen. Ein Vorschlag zur modularen Auswahl und Einführung geeigneter Komponenten. In: *Industrie Management* 26 (2), S. 65-68.
- Bracht, Uwe und Sontag, Till (2013):** Smarte Fabrikplanung. Digital factory goes mobile. In: *Werkstattstechnik online* 103 (4), S. 356-362.
- Brand, Marius; Loleit, Martha; Braun, Steffen (2012):** Szenarios zur Elektromobilität 2025. Mobility Innovation. Studie. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO).
- Brecher, Christian (Hg.) (2011):** Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).
- Brosch, Patrick (2014):** Smarte digitale Layoutplanung. Neue virtuelle und mobile Ansätze für Umplanungen. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2014. Aachen: Shaker (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, Bd. 32, Hg. v. Uwe Bracht).
- Burggräf, Peter; Dannapfel, Matthias; Schneidermann, Dennis; Ebade Esfahani, Matthias (2019):** Paradigmenwechsel im Fabrikplanungsdatenmanagement. Wie BIM Datenverknüpft, Fabrikplaner verbindet und Potenziale schafft. In: *Werkstattstechnik online* 109 (4), S. 260-267.
- Cirullies, Jan und Pikus, Yevgen (2017):** Intuitive Mensch-Maschine-Schnittstellen. Chatbots bieten eine einfache Möglichkeit zur vernetzten Nutzung heutiger Datensilos. In: *Logistik für Unternehmen* (9), S. 55-57.
- Claus, Volker und Schwill, Andreas (2006):** Duden Informatik. Ein Fachlexikon für Studium, Ausbildung und Beruf. 4. Auflage. Mannheim: Dudenverlag.
- Daimler AG (Daimler Aktiengesellschaft) (2018a):** FAPLIS CAD-Leitfaden. Online verfügbar unter <https://www.faplis.de/wiki/x/xwDY>, zuletzt geprüft am 06.02.2019.
- Daimler AG (Daimler Aktiengesellschaft) (Hg.) (2018b):** smartville. Informationen zum Werk Hambach. Online verfügbar unter <https://www.smart.com/de/de/index/smartville-hambach.html>, zuletzt geprüft am 06.02.2019.
- Dane, Erik und Pratt, Michael G. (2009):** Conceptualizing and measuring intuition: a review of recent trends. In: Gerard P. Hodgkinson und J. Kevin Ford (Hg.): *International Review of Industrial and Organizational Psychology*: John Wiley & Sons (Bd. 24), S. 1-40.

- Dehne-Niemann, Till E. (2013):** Intuition im Management - Fluch oder Segen? In: *Controlling & Management Review* 57 (3), S. 24-28.
- DIN 18227**, 1961-06: Flächen von Grundstücken und Bauwerken im Industriebau - Berechnungsgrundlagen.
- DIN 276-1**, 2008-12: Kosten im Bauwesen - Teil 1: Hochbau.
- DIN 277-1**, 2016-01: Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen - Teil 1: Hochbau.
- DIN 4172**, 2015-09: Maßordnung im Hochbau.
- DIN EN ISO 16739**, 2017-04: Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauindustrie und im Anlagenmanagement.
- DIN EN ISO 9241-112**, 2017-08: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 112: Grundsätze der Informationsdarstellung.
- DIN EN ISO 9241-125**, 2018-05: Ergonomie der Mensch-Maschine-Interaktion - Teil 125: Empfehlungen zur visuellen Informationsdarstellung.
- DIN EN ISO 9241-171**, 2008-10: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 171: Leitlinien für die Zugänglichkeit von Software.
- DIN EN ISO 9241-210**, 2011-01: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme.
- Dobos, László (2017):** Lager to go für die BMW Group. In: *Logistik Heute* 39 (Sonderheft).
- Dolezalek, Carl Martin (1973):** Planung von Fabrikanlagen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Dombrowski, Uwe (2016):** IFU Planungstisch 4.0. In: Thomas Bauernhansl und Uwe Dombrowski (Hg.): Einfluss von Industrie 4.0 auf unsere Fabriken und die Fabrikplanung. Eine Broschüre des Fachbeirats Deutscher Fachkongress Fabrikplanung.
- Dombrowski, Uwe; Ernst, Stefan; Fochler, Simon (2017):** Layoutplanung und -umsetzung unter volatilen Materialflussumgebungen. Einsatz von Scrum in der Umplanung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (11), S. 764-768.
- Dombrowski, Uwe (Hg.) (2015):** Lean Development. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Dombrowski, Uwe; Quack, Sebastian; Tiedemann, Hauke (2003):** Digitale Vernetzung von Produktentwicklung und Fabrikplanung. In: Egon Müller (Hg.): Vernetzt planen und produzieren. Tagungsband. VPP 2003. Chemnitz, 22.-23.09.2003. TU Chemnitz (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Sonderheft 7), S. 32-46.

Dombrowski, Uwe; Schulze, Sven; Mielke, Tim (2012): Lebenszyklusorientierung im Industriebau. In: ZI Jahrbuch. Gütersloh: Bauverlag BV, S. 124-131.

Dombrowski, Uwe; Schulze, Sven; Otano, Isabel Crespo (2009): Instandhaltungsmanagement als Gestaltungsfeld Ganzheitlicher Produktionssysteme. In: Jens Reichel, Gerhard Müller und Johannes Mandelartz (Hg.): Betriebliche Instandhaltung. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch), S. 29-43.

Dombrowski, Uwe und Hennersdorf, Sibylle (2010): Systematische Methodenauswahl in der Fabrikplanung. Eine Auswahlssystematik für Methoden und Werkzeuge der Fabrikplanung. In: *Werkstattstechnik online* 100 (4), S. 234-241.

Dombrowski, Uwe und Riechel, Christoph (2010): Entwicklung eines Multitouch-Planungstisches zur Unterstützung der partizipativen Layoutplanung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (12), S. 1091-1095.

DSTV (Deutscher Stahlbau-Verband) (2000): Stützenstellung im Geschossbau. Stahlbau Arbeitshilfe. 4. überarbeitete Auflage. bauforumstahl e.V. Online verfügbar unter <https://bauforumstahl.de/wissen/arbeitshilfen/>, zuletzt geprüft am 27.12.2018.

Duden. Das große Wörterbuch der deutschen Sprache **(1999)**. 3., völlig neu bearb. und erw. Aufl. 10 Bände (Bd. 5).

Duden (Duden online) (2019a): Intuition. Bedeutungsübersicht. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Intuition>, zuletzt aktualisiert am 06.02.2019.

Duden (Duden online) (2019b): intuitiv. Bedeutungsübersicht. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/intuitiv>, zuletzt aktualisiert am 06.02.2019.

Dunker, Hilmar (2019): VDA rechnet mit steigenden Logistikkosten. Klimaschutzziele der Bundesregierung verändern die Wertströme und verteuern die Logistik. Automobil Produktion. Online verfügbar unter <https://www.automobil-produktion.de/hersteller/wirtschaft/vda-rechnet-mit-steigenden-logistikkosten-280.html>, zuletzt aktualisiert am 06.02.2019, zuletzt geprüft am 01.03.2019.

Ebner, Andreas; Kammergruber, Horenburg; Günthner, Willibald (2012): Logistics and Layout Planning of Construction Equipment on a VR-Multi-Touch-Tablet. In: Yu-Cheng Lin und Shih-Chung Jessy Kang (Hg.): Proceedings of the 12th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality. CONVR 2012. Taipei, November 1 - 2. National Taiwan University Press, S. 552-560.

eKiosk (eKiosk GmbH) (2019): Multi Touch Table. Online verfügbar unter <https://ekiosk.com/multi-touch-table/>, zuletzt geprüft am 27.05.2019.

- Endruweit, Günter; Trommsdorff, Giesela; Burzan, Nicole (Hg.) (2014):** Wörterbuch der Soziologie. 3., völlig überarb. Aufl. Konstanz: UVK Verlagsgesellschaft (UTB, Bd. 8566).
- Engel, Mathias; Riegmann, Tobias; Schäfer, Achim; Günther, Ulrich (2010):** Zehn Jahre Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Vergangenheit und Zukunft der Digitalen Fabrik - DIFA-Status Quo. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (3), S. 178-183.
- Erlach, Klaus (2017):** Wege zur zukunftsfähigen Fabrik. In: *interaktiv Das Kundenmagazin des Fraunhofer IPA* (2), S. 11-15.
- Eversheim, Walter; Schuh, Günther (Hg.) (1996):** Produktion und Management "Betriebshütte". Teil 2. Akademischer Verein Hütte. 7., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: Springer.
- Faber, H. und Bracht, Uwe (1988):** CAD-Aided Factory-Planning. In: *Werkstattstechnik* 78 (5), S. 319-323.
- Fjeld, Morten; Bichsel, Martin; Rauterberg, Matthias (1999):** BUILD-IT: Intuitive plant layout mediated by natural interaction. In: *Arbete Människa Miljö & Nordisk Ergonomi (Work, Human being, Environment)* (1), S. 49-56.
- Fleisch, Elgar; Kickuth, Michael; Dierkes, Markus (2003):** Ubiquitous Computing: Auswirkungen auf die Industrie. In: *Industrie Management* 19 (6), S. 29-31.
- Freitag, Michael (2014):** Die Rezepte der Volkswagen-Planer. manager magazin. Online verfügbar unter <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/volkswagen-planer-wie-baue-ich-ein-budget-car-a-959552-5.html>, zuletzt geprüft am 31.01.2019.
- Fritz, Martin; Kiani-Kreß, Rüdiger; Seiwert, Martin; Willershausen, Florian; Schumacher, Harald; Kamp, Matthias; Hennersdorf, Angela; Kroker, Michael (2011):** Globaler Poker. In: *WirtschaftsWoche* (52), S. 64-71.
- Gabbatsch, Lena (2015):** Fabrikplanung der Zukunft. IdeenExpo 2015. Online verfügbar unter <http://www.ideenexpo.de/blog/?p=2818>, zuletzt geprüft am 31.01.2019.
- Gärtner, Stefan (Hg.) (2018):** Layoutplanung. Vom Grundriß zum Grundstein: das Layout als gemeinsamer Nenner. LogistikPlan. Online verfügbar unter <https://www.logistikplan.de/leistungen/planung/fabrikplanung/layoutplanung>, zuletzt geprüft am 01.02.2019.
- Gäse, Thomas; Günther, Uwe; Heller, André; Müller, Egon (2005):** Kooperative Planung in Netzwerken mit visTABLE. Verteilte Layoutplanung und Visualisierung von Produktionssystemen. In: *Werkstattstechnik online* 95 (4), S. 205-209.
- Gausemeier, Jürgen; Fink, Alexander; Schlake, Oliver (1996):** Szenario-Management. Planen und Führen mit Szenarien. 2., bearb. Aufl. München, Wien: Hanser.

- Granig, Peter (2007):** Innovationsbewertung. Potentialprognose und -steuerung durch Ertrags- und Risikosimulation. Zugl.: Klagenfurt, Univ., Diss., 2005. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- Grundig, Claus-Gerold (2018):** Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 6., neu bearbeitete Auflage. München: Hanser.
- Haag, Christoph; Schuh, Günther; Kreysa, Jennifer; Schmelter, Kristin (2011):** Technologiebewertung. In: Günther Schuh und Sascha Klappert (Hg.): Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2. 2., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer (VDI-Buch), 309-366.
- Harms, Thomas (2004):** Agentenbasierte Fabrikstrukturplanung. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2004. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum (Berichte aus dem IFA, 2/2004, Hg. v. Peter Nyhuis).
- Heger, Christoph Lutz (2007):** Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2006. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum (Berichte aus dem IFA, 1/2007, Hg. v. Peter Nyhuis).
- Herbig, Nico (2015):** DEPlaTa - A Digital Enhanced Planning Table for Rough Factory Layouts. Master's Thesis. Universität des Saarlandes, Saarbrücken. Online verfügbar unter https://www.dfki.de/web/forschung/publikationen/renameFileForDownload?filename=thesis_ma_nico_herbig.pdf&file_id=uploads_3474, zuletzt geprüft am 16.09.2018.
- Herlyn, Wilmljakob (2012):** PPS im Automobilbau. Produktionsprogrammplanung und -steuerung von Fahrzeugen und Aggregaten. München: Carl Hanser Verlag.
- Hernández, Roberto (2003):** Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2002. Düsseldorf: VDI-Verlag (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft, Bd. 149).
- Hirsch, Benjamin; Lübkemann, Jens; Nyhuis, Peter (2013):** Synchronisation von Planungsdisziplinen. Steigerung der Ergebnisqualität in Fabrikplanungsprojekten. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 108 (11), S. 850-854.
- Hornecker, Eva und Buur, Jacob (2006):** Getting a grip on tangible interaction: a framework on physical space and social interaction. In: Rebecca Grinter und Gary M. Olson (Hg.): Proceedings of ACM CHI 2006 Conference on Human Factors in Computing Systems. Montréal, Québec, Canada, 22. - 27. April 2006. New York: ACM Press.
- Horstmeier, Ilka (2018):** „Solitäre Fertigung ist Auslaufmodell“. Interview. In: *Automobil Produktion* (7-8), S. 18-21.

- ISO/IEC 11581-10**, 2010-12: Informationstechnik - Icons für Benutzerschnittstellen - Teil 10: Rahmenbedingungen und allgemeine Richtlinien.
- Jossen, Andreas und Weydanz, Wolfgang (2006)**: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. Neusäß: Ubooks.
- Kampker, Achim (2014)**: Elektromobilproduktion. Berlin: Springer Vieweg.
- Kampker, Achim; Burggräf, Peter; Krunke, Moritz; Kreisköther, Kai; Voet, Hanno; Backs, Matthias (2014)**: Das Aachener Fabrikplanungsvorgehen. Agile Fabrikplanung im turbulenten Umfeld. In: *Werkstattstechnik online* 104 (4), S. 192-196.
- Kampker, Achim; Burggräf, Peter; Meckelnborg, Alexander; Kreisköther, Kai (2012)**: Effiziente Layoutplanung in interdisziplinären Teams. Komplexitätsgerechte Tools zur Layoutplanung sichern den nachhaltigen Projekterfolg. In: *VDI-Z Integrierte Produktion* 154 (11/12), S. 74-75.
- Kerber, Sebastian (2016)**: Prozessgestaltung zum Einsatz digitaler Fabrikgesamtmodelle. Anwendung in der Produktionsplanung eines Automobilherstellers. Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2015. Wiesbaden: Springer (AutoUni – Schriftenreihe, Bd. 86, Hg. v. Volkswagen Aktiengesellschaft).
- Kettner, Hans; Schmidt, Jürgen; Greim, Hans-Robert (1984)**: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München, Wien: Hanser.
- Klappenbach, Ruth; Steinitz, Wolfgang (Hg.) (1969)**: Wörterbuch der deutschen Gegenwartssprache. Deutsche Akademie der Wissenschaften. Berlin: Akademie-Verlag (Bd. 3).
- Klein, Christian (2018a)**: Dürr baut intelligente Lackiererei für Elektrofahrzeuge in China. Automobil Produktion. Online verfügbar unter <https://www.automobil-produktion.de/technik-produktion/duerr-baut-intelligente-lackiererei-fuer-elektrofahrzeuge-in-china-357.html>, zuletzt aktualisiert am 05.01.2018, zuletzt geprüft am 11.02.2019.
- Klein, Christian (2018b)**: Leuchtfeuer Digitalisierung. In: *Automobil Produktion* (7-8), S. 12-16.
- Klemke, Tim (2014)**: Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2013. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum (Berichte aus dem IFA, 1/2014, Hg. v. Peter Nyhuis).
- Klug, Florian (2018)**: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. 2. Auflage. Berlin: Springer (VDI-Buch).

Knobel, Markus; Krumm, Holger; Kaufhold, Tobias (2004): Praktische Gestaltung von 3D-Produkt- und Prozessvisualisierung im industriellen Umfeld. In: Jürgen Gausemeier und Michael Grafe (Hg.): *Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung*. Tagungsband. 3. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn, 17.6.-18.6.2004. Heinz Nixdorf Institut (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 149), S. 215-230.

Kochendörfer, Bernd; Liebchen, Jens H.; Viering, Markus G. (2018): Bau-Projekt-Management. Grundlagen und Vorgehensweisen. 5., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg (Leitfaden des Baubetriebs und der Bauwirtschaft).

König, Alexander (2013): Entwicklung eines digitalen Fabrikgesamtmodells und dessen Integration in die Fabrikstrukturplanung eines Automobilherstellers. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2013. Aachen: Shaker (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, Bd. 30, Hg. v. Uwe Bracht).

Köth, Claus-Peter (2011): Aufgeräumt und intuitiv bedienbar. In: *Automobil Industrie* (7-8), S. 50-51.

Kouba, Stefan und Dickson, Nicholas (2015): Intuitive Touchtechniken. Halbleiterbasierte elektronische Komponenten und deren Integration. In: *ATZelextronik* 10 (5), S. 16-24.

Kuhnert, Felix; Zuberer, Stefanie; Viereckl, Richard; Weber, Heiko; Kliesing, Annabelle (2018): Automotive Trendbarometer. Befragung von Managern der Automobilbranche. Studie. PricewaterhouseCoopers (PwC). Online verfügbar unter <https://www.strategyand.pwc.com/de/studie/auto-trendbarometer>, zuletzt geprüft am 18.09.2018.

Loos, Manuel Norbert (2013): Daten- und termingesteuerte Entscheidungsmethodik der Fabrikplanung unter Berücksichtigung der Produktentstehung. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2013. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe, 1 - 2013, Hg. v. Jivka Ovtcharova).

Loos, Manuel Norbert und Körkemeyer, Karsten (2014): Daten- und termingesteuerte Entscheidungsmethodik der Fabrikplanung - ein industrieerprobter Ansatz zur Entscheidungsfindung im Bauwesen. In: *Bauingenieur* 89 (2), S. 48-56.

Lübke mann, Jens; Canitez, Ali; Nyhuis, Peter (2016): Analyse des Restrukturierungsbedarfs von Fabriken. Anwendung eines Beschreibungsmodells zur Einflussanalyse von Veränderungstreibern auf Strukturelemente. In: *Werkstattstechnik online* 106 (4), S. 255-259.

Lübke mann, Jens und Nyhuis, Peter (2016): Modellbasierte Restrukturierung von Fabriken. Auswirkungen von Veränderungen auf die Fabrik sicher abschätzen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (1), S. 7-10.

- Machate, Joachim; Schäffler, Anna; Ackermann, Sigrid (2013):** A touch of the future - Einsatzbereiche für Multi-Touch-Anwendungen. In: Thomas Schlegel (Hg.): Multi-Touch. Interaktion durch Berührung. Berlin: Springer Vieweg (Xpert.press), S. 13-44.
- Macht, Michael (2011):** Konzernweite Standardisierung durch MQB. Interview. Automobil Industrie. Online verfügbar unter <https://www.automobil-industrie.vogel.de/konzernweite-standardisierung-durch-mqb-a-335304/>, zuletzt geprüft am 30.01.2019.
- Marczinski, Götz (2004):** Digitale Fabrik - anspruchsvolle Technologien sinnvoll einsetzen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 99 (11), S. 666-669.
- Matysczok, Carsten; Kühn, Markus; Schele, Moritz (2018):** Mit dem digitalen Zwilling die Wettbewerber abhängen. In: *Aktuelle Technik* (3), S. 24-27.
- Maurer, Andreas und Stark, Wilko Andreas (2001):** Steering Carmaking into the 21th Century. From today's best practices to the transformed plants of 2020. The Boston Consulting Group. Boston.
- Mayer, Bettina (2018):** Autonom durch die Produktion. In: *Automobil Produktion* (1-2), S. 12-15.
- Menzel, Wolfgang (2000):** Partizipative Fabrikplanung. Grundlagen und Anwendung. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 1999. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verlag (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik, Bd. 546).
- Möhrle, Markus und Emmelmann, Claus (2016):** Fabrikstrukturen für die additive Fertigung. Gestaltung der anforderungsgerechten Fabrikstruktur für die Produktion der Zukunft. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (9), S. 505-509.
- Mohs, Carsten; Hurtienne, Jörn; Kindsmüller, Martin Christof; Israel, Johann Habakuk; Meyer, Herbert A.; IUUI Research Group (2006):** IUUI – Intuitive Use of User Interfaces: Auf dem Weg zu einer wissenschaftlichen Basis für das Schlagwort „Intuitivität“. In: *MMI-Interaktiv* (11), S. 75-84.
- Müller, Egon; Engelmann, Jörg; Jörg, Strauch; Löffler, Thomas (2009):** Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Müller, Egon; Gäse, Thomas; Riegel, Jörg (2003):** Layoutplanung partizipativ und vernetzt. visTABLE – ein neues interaktives Planungssystem für die Digitale Fabrik. In: *Werkstattstechnik online* 93 (4), S. 266-270.
- Müller, Nico; Wagner, Maximilian; Heß, Peter (2017):** Intuitive Programmierung für die Mensch-Roboter-Kollaboration. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (7-8), S. 477-480.

- Müller, Rainer; Müller-Polyzou, Ralf; Hörauf, Leenhard; Bashir, Attique; Karkowski, Martin; Vesper, Denise; Gärtner, Steffen (2018):** Intuitive Bedienung laserbasierter Montageassistenten. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (6), S. 363-368.
- Münnich, Mario (2014):** Strategische multikriterielle Standort- und Fabrikplanungsmethodik mittels szenariendifferenzierter und risikobasierter Produktrechnungen. Entwicklung einer Bewertungsmethode zur wirtschaftlichen und strategischen Veränderung von Automobilstandorten am Beispiel des Untersuchungsobjektes Elektromobilität. Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ. Diss., 2014 (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Bd. 107).
- Nonaka, Ikujiro und Takeuchi, Hirotaka (2012):** Die Organisation des Wissens. Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen. 2. Auflage. Frankfurt am Main: Campus Verlag.
- Nyhuis, Peter und Bischoff, Jürgen (2017):** Die Fabrikplanung der Zukunft. 14. Deutscher Fachkongress Fabrikplanung. Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA); agiplan GmbH. Ludwigsburg, 14.11.2017.
- Palluck, Markus (2011):** Unternehmenszielorientierte Fabrikplanung im Kontext eines Ganzheitlichen Produktionssystems. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2011. Aachen: Shaker (Schriftenreihe des IFU, Bd. 20).
- Pawellek, Günther (2014):** Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer (VDI-Buch).
- Petzelt, Dominik; Schallow, Julian; Deuse, Jochen (2010):** Ziele und Nutzer der Digitalen Fabrik. Untersuchung der Ziele und des Nutzens aus Sicht von Wissenschaft und Industrie. In: *Werkstattstechnik online* 100 (3), 131-135.
- Plavis (plavis GmbH) (2018):** visTABLE. Innovative Fabrikplanungswerkzeuge. Online verfügbar unter <http://www.vistable.de/>, zuletzt geprüft am 07.09.2018.
- Precht, Tobias; Schaaf, Christian; Stäbler, Julia (2010):** Fabrikplanungstisch. Projektdokumentation. Hochschule für Gestaltung, Schwäbisch Gmünd.
- Quasdorff, Olaf (2016):** Die Lean Factory unter Berücksichtigung der Digitalen Fabrik. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2016. Aachen: Shaker (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, Bd. 36, Hg. v. Uwe Bracht).
- Rauterberg, Matthias; Fjeld, Morten; Krueger, Helmut; Bichsel, Martin; Leonhardt, U.; Meier, M. (1997):** BUILD-IT: a computer vision-based interaction technique for a planning tool. In: Harold Thimbleby, Brid O'Conaill und Peter J. Thomas (Hg.): People and Computers XII. Proceedings of HCI '97. London: Springer, S. 303-314.

- Reichardt, Jürgen und Gottswinter, Christian (2004):** Synergetische Fabrikplanung. Montagewerk mit den Planungstechniken aus dem Automobilbau realisiert. In: *industrieBAU* 50 (3), S. 52-55.
- Reichardt, Jürgen und Pfeifer, Ingo (2007):** Phasenmodell der Synergetischen Fabrikplanung. Stand der Forschung und Praxisbeispiele. In: *Werkstattstechnik online* 97 (4), S. 218-225.
- Reinhart, Gunther (2017):** Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser.
- Reinhart, Gunther; Krebs, Pascal; Schellmann, Hendrik (2008):** Flexibilität und Wandlungsfähigkeit - das richtige Maß finden. In: Michael Zäh, Hartmut Hoffmann und Gunther Reinhart (Hg.): Münchener Kolloquium. Innovationen für die Produktion. Produktionskongress, 9. Oktober 2008. München: Herbert Utz, S. 45-55.
- Reinhart, Gunther; Schack, Rainer; Müller, Stefan (2006):** Mit Durchhaltevermögen zum Erfolg. Anwendungsorientierte Lösungen für die Digitale Fabrik. In: *Werkstatt+Betrieb* 139 (9), S. 2-6.
- Röhl, Horst und König, Alexander (2014):** Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Einsatz digitaler Werkzeuge in der Fabrikstrukturplanung bei VW. BRZ-Mittelstands-Forum, 2014. Online verfügbar unter https://www.brz.eu/fileadmin/editors/files/de/d_docs/event/forum_2014/presentationen/07_Digitale_Fabrik_in_der_Automobilindustrie.pdf, zuletzt geprüft am 11.02.2019.
- Rohling, Gitta (2012):** Intelligent integriert. Bausteine für mehr Effizienz. In: *Pictures of the Future* (Frühjahr), S. 111-113.
- Ropohl, Günter (2009):** Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. 3., überarbeitete Auflage. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Roschelle, Jeremy und Teasley, Stephanie D. (1995):** The Construction of Shared Knowledge in Collaborative Problem Solving. In: Claire O'Malley (Hg.): Computer Supported Collaborative Learning. Berlin, Heidelberg: Springer (NATO ASI Series, Series F, Bd. 128), S. 69-97.
- Schäfer, Simon F. (2015):** Entwicklung und Implementierung einer graphischen Benutzeroberfläche zur bidirektionalen Layoutplanung mit interaktiven Planungssystemen. Masterarbeit. Technische Universität Clausthal. Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB).
- Schäfer, Simon F. und Bracht, Uwe (2018):** Intuitive, digitale Strukturlayoutplanung. Gemeinsame, kreative Lösungsansätze bei disruptiven Produktionsprogrammen in der Automobilindustrie. In: *Werkstattstechnik online* 108 (9), S. 611-616.

- Schäfers, Bernhard (Hg.) (1999):** Einführung in die Gruppensoziologie. Geschichte, Theorien, Analysen. 3., korrigierte Aufl. Wiesbaden: Quelle & Meyer (UTB für Wissenschaft, Bd. 996).
- Schallow, Julian; Ludevig, Jan; Schmidt, Maurice; Deuse, Jochen; Marczinski, Götz (2014):** Zukunftsperspektiven der Digitalen Fabrik. Verständnis, Umsetzungsstand und Entwicklungsmöglichkeiten der digitalen Produktionsplanung. In: *Werkstattstechnik online* 104 (3), S. 139-145.
- Schenk, Michael; Schulte, Helmut (Hg.) (2003):** Typologisierung von Fabriken - Ein Element der strategischen Zielplanung. Unter Mitarbeit von Christian Koerber, Steffen Gröpke, Gregor Sallaba und Thomas Dengler. Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Schriftenreihe ProTT, Bd. 3).
- Schenk, Michael; Wirth, Siegfried; Müller, Egon (2014):** Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Schlange, Christian (2010):** Integrierte Struktur- und Layoutplanung unter Nutzung erweiterter virtueller Fabrikmodelle. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2010. Aachen: Shaker (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, Bd. 23, Hg. v. Uwe Bracht).
- Schlegel, Alexander; Börner, Frank; Müller, Egon; Lavorgna, Antonio (2014):** Partizipative Layoutplanung mit Augmented Reality. Ein Ansatz zur Erweiterung der Layoutgestaltung in der Fabrikplanung mit AR-Techniken. In: *Industrie Management* 30 (2), S. 35-39.
- Schmicker, Sonja; Klaeger, Siegfried; Lengert, Elke (1994):** Mitarbeiterbeteiligung bei betrieblichen Innovationen. Grundlagen für den betrieblichen Anwender - praktische Lösungsbeispiele. Hg. v. Institut Zukunftswerkstatt "Mensch - Umwelt - Technik". Magdeburg.
- Schmidt, Jürgen (1977):** Systematische Zusammenhänge und raumqualitative Einflüsse bei der Planung von Fabrikanlagen. Dissertation. Technische Universität Hannover.
- Schmigalla, Hans (1995):** Fabrikplanung. Begriffe und Zusammenhänge. 1. Aufl. München, Wien: Hanser (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation).
- Schneider, Andreas und Grösser, Stefan N. (2013):** Elektromobilität. Ist das Elektrofahrzeug eine disruptive Innovation? In: *Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft* 16 (1), S. 34-42.
- Schönheit, Martin (2013):** Fabrikplanung im globalen Kontext. In: *VDI-Z Integrierte Produktion* 155 (1/2), S. 84-86.
- Schrage, Michael (1990):** Shared minds. The new technologies of collaboration. New York: Random House.

- Schuh, Günther; Gottschalk, Sebastian; Lösch, Felix; Wesch, Cathrin (2007):** Fabrikplanung im Gegenstromverfahren. In: *Werkstattstechnik online* 97 (4), S. 195-199.
- Schuh, Günther; Kampker, Achim; Wesch-Potente, Cathrin (2011):** Condition based factory planning. In: *Production Engineering* 5 (1), S. 89-94.
- Schuh, Günther; Klocke, Fritz; Straube, Andreas M.; Ripp, Stephan; Hollreiser, Johannes (2002):** Integration als Grundlage der digitalen Fabrikplanung. Planungstisch und Virtual Reality gemeinsam bei BMW im Einsatz. In: *VDI-Z Integrierte Produktion* 144 (11/12), S. 48-51.
- Schuh, Günther und Burggräf, Peter (2018):** Künstliche Intelligenz im Internet of Production. In: *Werkstattstechnik online* 108 (4), S. 197.
- Schulz, Herbert (Hg.) (1990):** CIM-Planung und -Einführung. Ein Leitfaden für die Praxis. Berlin: Springer (CIM-Fachmann, Bd. 3, Hg. v. Ingward Bey).
- Schulze, Candy Patrick (2013):** Planung und Bewertung von Fabrikstrukturen. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2013. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum (Berichte aus dem IFA, 4/2013, Hg. v. Peter Nyhuis).
- Shapiro, Stewart und Spence, Mark T. (1997):** Managerial Intuition: A Conceptual And Operational Framework. In: *Business Horizons* 40 (1), 63-68.
- Shariatzadeh, N.; Sivard, G.; Chen, D. (2012):** Software Evaluation Criteria for Rapid Factory Layout Planning, Design and Simulation. In: *Procedia CIRP* 3, S. 299-304.
- Sontag, Till Marius (2014):** Smarte Fabrikplanung. Mobile Applikationen zur Unterstützung der Fabrikplanung. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2013. Aachen: Shaker (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, Bd. 31, Hg. v. Uwe Bracht).
- Spath, Dieter; Bauer, Wilhelm; Voigt, Simon; Borrmann, Daniel; Herrmann, Florian; Brand, Marius; Rally, Peter; Rothfuss, Florian; Sachs, Carolina; Friedrich, Horst E.; Frieske, Benjamin; Propfe, Bernd; Redelbach, Martin; Schmid, Stephan; Dispan, Jürgen (2011):** Elektromobilität und Beschäftigung. Wirkungen der Fahrzeugelektrifizierung auf die Beschäftigung am Standort Deutschland (ELAB). Studie. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO).
- Spillner, Andrea (2012):** Entwicklung, Stand und Perspektiven der Digitalen Fabrik. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2011. Aachen: Shaker (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, Bd. 26, Hg. v. Uwe Bracht).
- Spur, Günter (Hg.) (1994):** Fabrikbetrieb. München, Wien: Hanser (Handbuch der Fertigungstechnik, Bd. 6, Hg. v. Günter Spur und Theodor Stöferle).

- Stark, Rainer; Kim, Marcus; Damerau, Thomas; Neumeyer, Sebastian; Vorsatz, Thomas (2015):** Notwendige Voraussetzungen für die Realisierung von Industrie 4.0. Ein Beitrag aus der Sicht der industriellen Informationstechnik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (3), S. 134-141.
- Tuckman, Bruce W. (1965):** Developmental sequence in small groups. In: *Psychological Bulletin* 63 (6), S. 384-399.
- Tuckman, Bruce W. und Jensen, Mary Ann C. (1977):** Stages of Small-Group Development Revisited. In: *Group and Organization Studies* 2 (4), S. 419-427.
- Tuhkanen, Pekka (2011):** Roboterzelle intuitiv steuern. In: *VDI-Z Integrierte Produktion* 153 (1/2), S. 36-37.
- Ulbrich, Thomas (2018):** "Der erste Aufschlag muss sitzen". Interview. In: *Automobil Produktion* (9), S. 18-20.
- Underkoffler, John und Ishii, Hiroshi (1999):** Urp: A Luminous-Table Workbench for Urban Planning and Design. In: Marian G. Williams und Mark W. Altom (Hg.): Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '99. Pittsburgh, Pennsylvania, United States, 15.-20.05. New York, NY: ACM, S. 386-393.
- VDA (Verband der Automobilindustrie) (2009):** 3D Datenaustausch in der Fabrikplanung. Online verfügbar unter <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/3d-datenaustausch-in-der-fabrikplanung.html>, zuletzt geprüft am 06.09.2018.
- VDA (Verband der Automobilindustrie) (2015):** Jahresbericht 2015.
- VDA-Empfehlung 4960, 1993-05:** CAD/CAM-Datenaustausch in der Betriebsstättenplanung (VDABS).
- VDI 2552 Blatt 4, 2018-10:** Building Information Modeling - Anforderungen an den Datenaustausch.
- VDI 3644, 2010-08:** Analyse und Planung von Betriebsflächen - Grundlagen, Anwendungen und Beispiele.
- VDI 4499 Blatt 1, 2008-02:** Digitale Fabrik - Grundlagen.
- VDI 4499 Blatt 3, 2016-04 (Entwurf):** Digitale Fabrik - Datenmanagement und Systemarchitektur.
- VDI 5200 Blatt 1, 2011-02:** Fabrikplanung - Planungsvorgehen.
- VDI 5200 Blatt 2, 2016-05:** Fabrikplanung - Morphologisches Modell der Fabrik zur Zielfestlegung in der Fabrikplanung.
- VDI/BS 2552 Blatt 8.1, 2019-01:** Building Information Modeling - Qualifikationen - Basiskenntnisse.

- Villar, Nicolas; Cletheroe, Daniel; Saul, Greg; Holz, Christian; Regan, Tim; Salandin, Oscar; Sra, Misha; Yeo, Hui-Shyong; Field, William; Zhang, Haiyan (2018):** Project Zanzibar: A Portable and Flexible Tangible Interaction Platform. In: Regan Mandryk, Mark Hancock, Mark Perry und Anna Cox (Hg.): CHI 2018 Proceedings. Conference on Human Factors in Computing Systems. Montreal QC, Canada, April 21-26. CHI; Association for Computing Machinery; Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY: Association for Computing Machinery (ACM), zuletzt geprüft am 05.09.2018.
- Vogel, Jürgen (2015):** Prognose von Zeitreihen. Eine Einführung für Wirtschaftswissenschaftler. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Volk, Frank (2018):** Die Zukunft. In: *Automobil Produktion* (9), S. 12-16.
- VW AG (Volkswagen Aktiengesellschaft) (Hg.) (2007):** Nicht von Pappe. Online verfügbar unter http://autogramm.volkswagen.de/05_07/standorte/standorte_19.html, zuletzt geprüft am 25.03.2019.
- VWoA (Volkswagen Group of America) (2019):** Chattanooga Facts. Online verfügbar unter <http://www.volkswagengroupofamerica.com/chattanooga-facts>, zuletzt geprüft am 31.01.2019.
- Wahren, Heinz-Kurt E. (1994):** Gruppen- und Teamarbeit in Unternehmen. Berlin, New York: De Gruyter (De Gruyter Lehrbuch).
- Waltl, Hubert (2016):** Die 4 Herausforderungen von Audi in Mexiko. Interview. In: *Automobil Produktion* (11), S. 18-21.
- Wegener, Dieter (2018):** Digitalisierung revolutioniert die Wertschöpfungskette. In: *VDI-Z Integrierte Produktion* 160 (4), S. 3.
- Weißbrich, Alfons; Fuchsbauer, Bernhard; Heinrichs, Heinz-Josef; Plegniere, Heinz-Günter (2008):** Qualitätsmanagement in der gesamten Wertschöpfungskette. Grundlage des gemeinsamen Erfolgs. In: *ATZproduktion* (1), S. 7-12.
- Wenzel, Sigrid; Jessen, Ulrich; Bernhard, Jochen (2005):** Classifications and conventions structure the handling of models within the Digital Factory. In: *Computers in Industry* 56 (4), S. 334-346.
- Wesebaum, Sören; Mach, Florian; Ullmann, Georg (2016):** Grundzüge einer objektiven, mehrdimensionalen Fabrikbewertung. In: *VDI-Z Integrierte Produktion* 158 (9), S. 86-88.
- Wesebaum, Sören und Mach, Florian (2016):** Fabrikbewertung durch mathematische Modellierung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (3), S. 100-103.

- Westkämper, Engelbert; Pfeffer, Matthias; Dürr, Mark (2004):** Partizipative Fabrikplanung mit skalierbarem Modell. Ein Ebenenmodell zur schrittweisen Verfeinerung der Layouts mit „i-plant“. In: *Werkstattstechnik online* 94 (3), S. 48-51.
- Wiendahl, Hans-Peter (1996):** Grundlagen der Fabrikplanung. In: Walter Eversheim und Günther Schuh (Hg.): Produktion und Management "Betriebshütte". Teil 2. 7., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: Springer.
- Wiendahl, Hans-Peter (2002a):** Auf dem Weg zur "Digitalen Fabrik". In: *Werkstattstechnik online* 92 (4), S. 121.
- Wiendahl, Hans-Peter (2002b):** Wandlungsfähigkeit. Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. In: *Werkstattstechnik online* 92 (4), S. 122-127.
- Wiendahl, Hans-Peter; Fiebig, Christian; Harms, Thomas (2000):** Partizipative Fabrikplanung. Methoden zur erfolgreichen Mitarbeiterbeteiligung. Hg. v. Horst Wildemann. München: TCW Transfer-Centrum (TCW-Report, Nr. 23).
- Wiendahl, Hans-Peter; Hernández, Roberto; Grienitz, Volker (2002):** Planung wandlungsfähiger Fabriken. Erschließung von Potenzialen mit Hilfe des Szenario-Managements. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 97 (1-2), S. 12-17.
- Wiendahl, Hans-Peter; Nofen, Dirk; Klußmann, Jan Hinrich; Breitenbach, Frank (2005):** Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München: Hanser.
- Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Hernández, Roberto (2001):** Kooperative Fabrikplanung. Wandlungsfähigkeit durch zielorientierte Integration von Prozess- und Bauplanung. In: *Werkstattstechnik* 91 (4), S. 186-191.
- Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter (2014):** Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser.
- Wiendahl, Hans-Peter und Hernández, Roberto (2000):** Wandlungsfähigkeit - neues Zielfeld in der Fabrikplanung. In: *Industrie Management* 16 (5), S. 37-41.
- Wiendahl, Hans-Peter und Hernández, Roberto (2002):** Fabrikplanung im Blickpunkt. Herausforderung Wandlungsfähigkeit. In: *Werkstattstechnik online* 92 (4), S. 133-138.
- Wirth, Siegfried; Mann, H.; Otto, R. (2000):** Layoutplanung betrieblicher Funktionseinheiten. Leitfaden. Hg. v. Hartmut Enderlein, Alfred Förster, Joachim Petermann und Siegfried Wirth. Chemnitz: Inst. für Betriebswiss. und Fabrikssysteme (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Bd. 25).

- Wirth, Siegfried; Schenk, Michael; Müller, Egon (2011):** Fabrikarten, Fabriktypen und ihre Entwicklungsetappen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 106 (11), S. 799-802.
- Wurdig, Thomas Jörg und Wacker, Roland (2008):** Generische Simulationslösung für Fördertechnik. In: Markus Rabe (Hg.): *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. Zugl. ASIM-Mitteilung Nr. 118. 13. ASIM Fachtagung. Berlin, 01.-02. Oktober. Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 11-20.
- WZL (Werkzeugmaschinenlabor, RWTH Aachen) (2018):** Layoutplanung mit dem Fabrikplanungs-PowerPoint-AddIn (FP-PPT). Layoutplanung mit komplexitätsgerechten Softwaretools. Online verfügbar unter http://www.wzl.rwth-aachen.de/__C1256E970034898A.nsf/html/de_4d2e871cdd10c6acc1257bc80049c8e3.htm, zuletzt aktualisiert am 12.07.2018, zuletzt geprüft am 07.06.2019.
- Zäh, Michael F.; Müller, Nils; Rimpau, Christoph (2005):** A Holistic Framework for Enhancing the Changeability of Production Systems. In: Michael Zäh und Gunther Reinhart (Hg.): *Today's Reactions Tomorrow's Challenges*. 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). Garching, 22-23 September. Technische Universität München. München: Herbert Utz, S. 77-84.
- Zhang, Pengxiang; Bauer, Sebastian; Sontag, Till Marius (2017):** Mensch-Roboter-Kooperation in der Digitalen Fabrik. Konzept zur Planung und Absicherung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (1-2), S. 73-78.

Anhang

Aufgabenstellung zur Generalbebauungsplanung eines PKW-Werkes

I. Prämissen

- Als Grundlage dient der Standort Deutschland
- Der gesamte Produktionsprozess soll abgebildet werden (Gewerke: Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei, Montage und Logistik)
- Es wird ein neues Werk (Greenfield) gebaut
- Vorhaltefläche Fahrzeugversand für „Zwei-Tages-Produktion“
- Optimale Positionierung der Zählpunkte (möglichst nah beieinander)
- Erweiterungsflexibilität (Verdopplung der Produktionskapazität)
- Grundstück mit Optionsflächen wird pro Gruppe in Aufgabenteil 2 vorgegeben
- Normen der VDI 5200 einhalten

II. Vorgaben

Bereich	Fläche (m²)	Höhe (m)	Länge (m)	Raster (m*m)
Karobau	35.000	11,9		24x24
Logistik	18.500			
Presswerk	19.000	18,5		32,5x32,5
Lackiererei	30.000	21,5		12x12 oder 12x15
Teststrecke			2.000	
Abstellfläche und Versand (Fertigfahrzeuge)	15.000			
Mediencenter	5.000			
Abwasseraufbereitung	3.000			
Parkplatz (Mitarbeiter)				
Trainingscenter	2.500			
Technical Center	9.000	8,9		
Sequenzspeicher 2	10.000			
Spine	8.000			
Rechenzentrum	1.500			
Montage	40.000	8,9		24x24
Finish	9.000			

III. Erläuterungen zu den Gebäuden

Karosseriebau

Hier werden die im Presswerk produzierten Teile zu der Rohkarosserie zusammengefügt. Hierbei kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz (Schweißen, Kleben, Nieten, ...). Hoher Automatisierungsgrad.

LOC (Logistic Operations Center)

Werksinternes Lager von Zulieferteilen

Presswerk

Herstellung von Blechteilen. Blech wird in schweren Coils angeliefert, geschnitten und dann durch verschiedene Pressen zu Fahrzeugteilen umgeformt. Hohe Lärmemissionen.

Lackiererei

Lackierung der Rohkarosserie in mehreren Schritten (Korrosionsschutz, Schutzschicht, Schmucklack, Decklack)

Montage

Montage von zugelieferten Teilen: Kabelbaum, Interieur und Exterieur. Hochzeit (Vereinigung Karosse und Antriebsstrang), Einfüllen von Betriebsstoffen, Bespielen des Steuergeräts.

Finish

Einstellarbeiten (z.B. Spur) und Kontrollen, elektronische Funktionstests. Bei einigen Fahrzeugen Testfahrt und/oder Produkt-Audit.

Mediencenter

Versorgung des Werkes mit Energie

Technical Center

Pilothalle, Prüfzentrum bzw. Qualitätssicherung, Entwicklung, Erprobung

Sequenzspeicher 2

Entkopplung Lackiererei und Montage

Verwaltung

Bürobereiche für Werksleitung, Produktionssteuerung und Fachabteilungen.
Flächen des Gesundheitswesens und des Arbeitsschutzes.

Trainingscenter

Ausbildungszentrum: Ausbildung, Weiterbildung und Lehrgänge

IV. Weitere Vorgaben

Zu berücksichtigende allgemeine Flüsse

- Anlieferung
 - Anlieferung an die relevanten Gebäude sicherstellen
- Fertigungsfluss
 - Materialfluss innerhalb der Gebäude ist nicht zu planen und kann frei angenommen werden. (Bspw.: Ein- und Ausgang des Materialflusses an der gleichen Gebäudeseite, gegenüberliegend, usw.)
 - Materialfluss kann durch Fördertechnikbrücken zwischen den Gebäuden sich selbst und andere Flüsse kreuzen
- Fertigfahrzeuge
 - Abstellfläche und Abtransport
- Personalfluss
 - Werk wird für MA und Besucher über zentrale Hauptachse erschlossen
 - Minimale Anzahl Kontrollpunkte
 - Effiziente Wegestruktur
 - Reduktion Kreuzungspunkte
 - Kommunikationsprozesse
 - Interne Erschließung und gleichzeitige Flexibilisierung nach außen (Optionsflächen)
- Externe Zulieferer
 - An- und Ablieferung muss gewährleistet sein
 - Parkplätze müssen für Zulieferer nicht mitgeplant werden
 - Personalwege beachten

Kennzahlen Werk

- Fertigung von einem Fahrzeug pro Minute
 - Festes Taktniveau 60s
- Erweiterungskonzept
 - Mögliche Erweiterung auf zwei Fahrzeuge pro Minute
 - Bei Erweiterung bleibt die Taktzeit bestehen
- 2.500 Mitarbeiter
- 3 Schichten, 5 Tage pro Woche

Definitionen

- Erweiterte Funktionsbereiche:
 - Besucherzentrum, Auslieferungszentrum
 - Werkstatt/Tankstelle
 - Hotel/Gastronomie, Kindergarten...
- Optionsfläche: Möglicher Zukauf für Erweiterungen
- Erweiterungsfläche: Fläche, die für Erweiterungen vorgesehen ist und bereits gekauft ist.
- Zählpunkt (ZP) ist eine festgelegte Stufe im Fertigungsfluss zur Erfassung erreichter Zusammenbaustufen. Folgende ZP sind in die Planung mit einzubeziehen:
 - ZP 1: Rohkarosse (Ende Karosseriebau)
 - ZP 2: Karosse lackiert (Ende Lack)
 - ZP 3: Ende Karosseriemontage (Ende Montage)
 - ZP 4: Ende Wagenmontage (Anfang Finish)
 - ZP 5: Übergabe Vertrieb (Ende Finish)
- Logistikkonzept
 - Von außen nach innen
 - Ansiedlung eines Lieferantenparks (nicht zu planen)

Restriktionen

- Alle Hallen müssen von außen zugänglich sein (Logistik)
- Rettungswege beachten
- Vorgegebene Flächen berücksichtigen (Gebäude, Grünflächen, Zulieferer, ...)

Kennzahlen zur Optimierung

- Flächenbedarf
- Weglängen
- Abstand der wichtigen ZP untereinander
- Flüsse
- ...
- (siehe auch Ziele der Fabrikplanung)

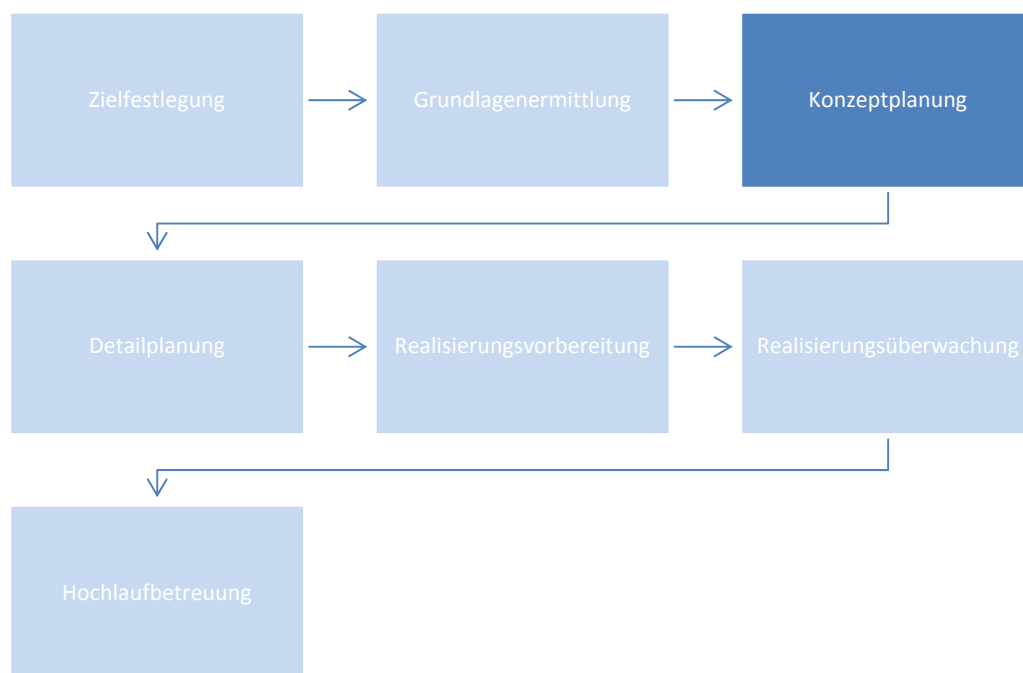
V. Richtlinie zur Fabrikplanung

Ziele der Fabrikplanung (VDI 5200, Blatt1)

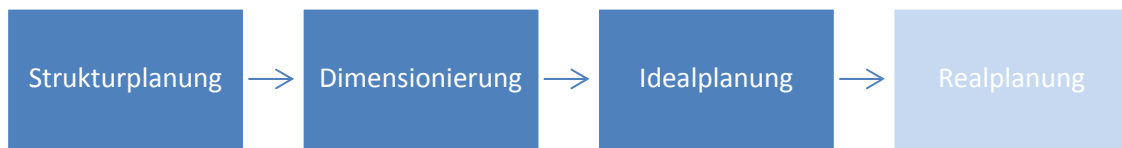
Die Fabrikplanung orientiert sich an unterschiedlichen Zielen für die Fabrik, die sich aus den Unternehmenszielen und Rahmenbedingungen ableiten. Der Erfüllungsgrad dieser Fabrikziele wird während des Planungsablaufs für unterschiedliche Planungsvarianten sowie nach der Realisierung für die erstellte Fabrik bewertet.

- Flexibilität und Wandlungsfähigkeit
- Produkt- und Produktionsprozessqualität
- Geschwindigkeit
- Wirtschaftlichkeit
- Mitarbeiterorientierung, Kommunikationsunterstützung und Attraktivität
- Nachhaltigkeit
- Transparenz

Planungsphasen der Fabrikplanung (VDI 5200, Blatt1)



Konzeptplanung



VI. Vorgehensweise

Strukturplanung

- Reihenfolge Produktion klären
- Beziehungen der Gebäude untereinander klären (Produktion, Information, ...)
- Priorisieren, welche Funktionen direkt nebeneinanderliegen sollten (bspw. per Matrix)
- Erweiterungsplanung
 - Aufteilung in 2 Baustufen (Welche Gebäude für Baustufe I, welche in Baustufe II?)
 - Erweiterungskonzept entwickeln (Baustufe II)

Die Strukturplanung dient der Festlegung der funktionalen und organisatorischen Einheiten der betrachteten Planungsebenen mit ihren wechselseitigen Beziehungen.

Als Ergebnis liegen das ideale Funktionsschema sowie das Kommunikationskonzept für die Fabrik vor.

Dimensionierung

- Gebäude und Flächengrößen bestimmen
- Konzepterstellung generelle Flüsse (Festlegung Hauptachsen)
 - Anlieferung, Abtransport der Fahrzeuge, Personen, Information...

Die Dimensionierung dient der Kapazitätsauslegung und der Ermittlung des Flächenbedarfs der Einheiten in der jeweiligen Planungsebene.

Als Ergebnis liegen die dimensionierten Ressourcen, das Logistikkonzept sowie das flächenmaßstäbliche Funktionsschema für die Fabrik vor.

Idealplanung

- Blocklayout zeichnen
 - Gebäudeflächen erstellen
 - Anordnen
 - Flüsse/Logistikwege kenntlich machen
 - Erweiterungsflächen ausweisen

Die Idealplanung dient der Absicherung der Fabrikziele, der Aufweitung des Lösungsraums für die Realplanung sowie als Referenz für die Bewertung der in der Realplanung erarbeiteten Lösungsvarianten.

Als Ergebnis liegen Ideallayoutvarianten mit jeweiligem Entwurf der Gebäudehülle vor.

Lebenslauf

Name: Simon F. Schäfer
Geburtsdatum: 22.10.1987
Geburtsort: Münster (Westf.)



Bildungsweg

03/2016 – 08/2019 Promotionsstudium, *Technische Universität Clausthal*
10/2012 – 10/2015 Studium Wirtschaftsingenieurwesen, *Technische Universität Clausthal*.
Studienrichtung: Produktion und Prozesse. Abschluss: Master of Science
10/2008 – 10/2013 Studium Wirtschaftsingenieurwesen, *Technische Universität Clausthal*.
Abschluss: Bachelor of Science
1998 – 2007 Gymnasium, *Paulinum Münster*. Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Beruflicher Werdegang

seit 04/2019 Lehrbeauftragter, *TU Clausthal, Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, Abteilung für Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik*
seit 03/2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, *TU Clausthal, Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, Abteilung für Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik*
11/2014 – 12/2015 Praktikum und Masterarbeit, *Volkswagen AG*
04/2014 – 09/2014 Tutor, *Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit*
03/2013 Studentische Hilfskraft, *Energieforschungszentrum Niedersachsen*
10/2012 – 09/2014 Tutor, *Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme*
08/2011 – 09/2011 Praktikum, *Bertrandt AG*
06/2008 – 08/2008 Praktikum, *BASF Coatings AG*
07/2007 – 03/2008 Wehrdienst, *Unteroffizierschule des Heeres*

Sonstiges

04/2011 – 11/2014 Mitarbeit in der Hochschulpolitik, u.a. Präsident des Studierendenparlaments und Mitglied des Ältestenrates
2018 Lehrpreis der Technischen Universität Clausthal für die ganzheitliche Gestaltung des Fachpraktikums „Digitale Fabrik“